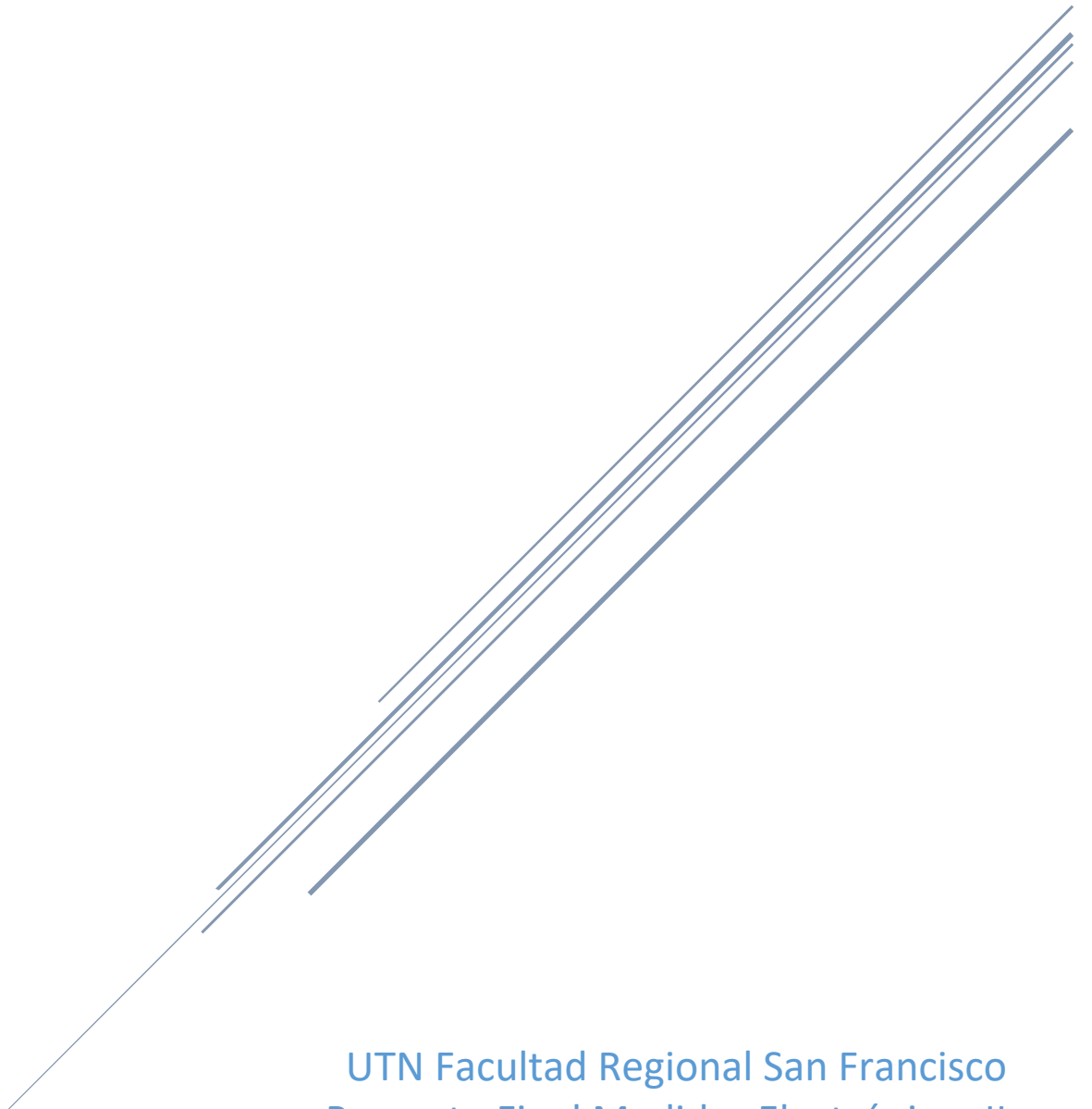


DC ELECTRONIC LOAD

Desarrollo de carga electrónica para corriente continua



UTN Facultad Regional San Francisco
Proyecto Final Medidas Electrónicas II
Pagani Agustín - Pairola Nahuel

Tabla de contenido

1- Introducción	2
1.1- Alcance	2
2- Desarrollo	2
2.1- Resumen	2
2.2- Control PID	3
2.2.1- Modelización matemática del sistema: función de transferencia	4
2.2.2- MATLAB	6
2.2.2.1- Análisis a lazo abierto: campo continuo.....	8
Diagrama de Bode.....	8
2.2.2.2- Análisis a lazo cerrado: campo continuo	8
Respuesta a escalón unitario	8
Diagrama de polos y ceros.....	9
Diagrama de Bode.....	9
Diagrama de Nyquist.....	9
2.2.2.3- Análisis a lazo cerrado: campo discreto	10
Respuesta escalón unitario	10
Diagrama de polos y ceros.....	10
Diagrama de Bode.....	11
Diagrama de Nyquist.....	11
2.2.3- Implementación de PID	12
2.3- Hardware.....	13
2.4- Software	15
2.4.1- Estructuración.....	15
2.4.2- Interrupciones.....	16
2.4.3- USB.....	17
2.5. Mediciones y contrastaciones.....	17
2.5.1- Corriente.....	17
2.5.1.1- Sensor efecto Hall.....	17
2.5.1.2- Contrastación	18
2.5.2- Tensión.....	19
2.5.2.1- Contrastación	19
2.5.3- Potencia	19
2.5.4- Resistencia	20
2.5.5- Temperatura	20
3- Conclusión	21

1- Introducción

El presente informe desarrolla el **diseño, modelización y armado de una carga electrónica variable controlada**. Cuestión de facilitar la comprensión de lo propuesto, se define a una **carga** como **cualquier componente o dispositivo que ofrece resistencia al paso de la corriente eléctrica**. Si a esta definición se le añade **electrónica** se hace referencia a un **circuito electrónico capaz de ofrecer resistencia al paso de la corriente con posibilidades de control de consumo, interfaz hombre-máquina (HMI), almacenamiento de datos, conectividad, protecciones, entre otros**.

1.1- Alcance

Esta carga electrónica tiene como **objetivo principal** ser un pequeño **desarrollo I+D a fin de evaluar fuentes de alimentación controlando corriente mediante un PID**. Dada la necesidad de medir la tensión aplicada por la fuente, es posible obtener la potencia consumida y el valor de resistencia simulado por la carga, datos disponibles en la HMI.

Es importante destacar que como todo prototipo posee un alcance determinado, por ende, se han planteado los siguientes objetivos:

1. Evaluar capacidad de fuentes de alimentación consumiendo una corriente mínima de $500mA$ al aplicar una tensión mínima de $2V$, disipando una potencia máxima de $90W$.
2. Controlar la corriente consumida mediante un algoritmo de control PID, contando con la posibilidad de visualizar y modificar el valor de corriente deseado (Set Point) mediante una interfaz HMI.
3. Proteger al circuito mediante sobretensión, cortocircuito y posibles desconexiones y caídas de tensión de la fuente a evaluar.
4. Modificar los parámetros del control PID mediante una comunicación con la PC.

Ya establecido el alcance se evaluarán los resultados al concluir el presente informe, dando inicio al desarrollo del proyecto.

2- Desarrollo

2.1- Resumen

El diagrama en bloques de la imagen 1 muestra las partes principales de la carga electrónica desarrollada seguido de una breve descripción de sus partes.

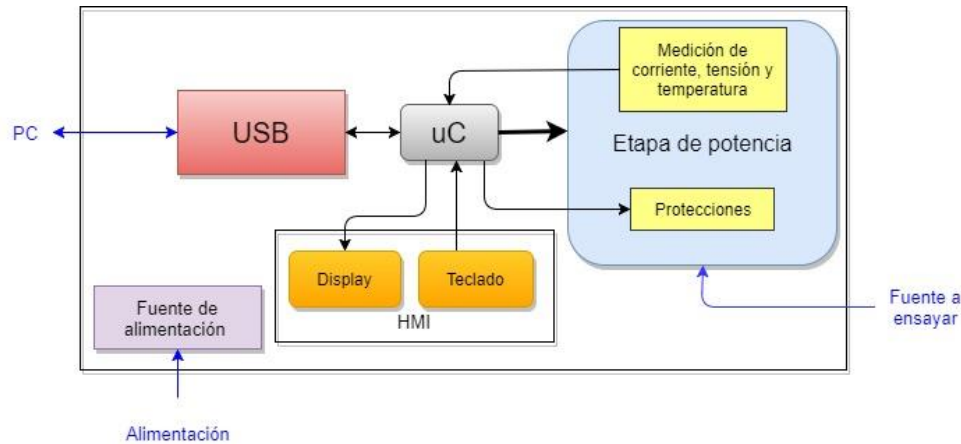


Imagen 1: diagrama en bloques de carga electrónica

- **uC:** microcontrolador PIC18F2550 de la firma Microchip, programado en lenguaje C con IDE MPLAB X v3.55 y compilador XC8 v1.42.
- **HMI:** Interfaz Hombre-Máquina formada por display LCD 16x2 y teclado para interacción con menú.
- **Etapa de potencia:** formada por un filtro Sallen-Key y un circuito Darlington, en conjunto permiten controlar la corriente consumida de la fuente de alimentación.
 - *Medición de corriente:* sensor de efector Hall ACS712ELECTR-05B-T de la firma Allegro.
 - *Medición de tensión:* divisor resistivo formado por resistencias de 1% de tolerancia.
 - *Medición de temperatura:* NTC tipo NTCALUG02A502G de la firma VISHAY, 5kΩ a 25°C, para montaje en disipador.
 - *Protecciones:* circuito formado por fusible de 4A y relé.
- **USB:** comunicación con la PC mediante integrado MCP2200 de la firma Microchip.
- **Fuente de alimentación:** formada por fuente de energía externa y adaptación de niveles de tensión.

2.2- Control PID

La imagen 2 muestra el diagrama en bloques del circuito de control de la carga electrónica.

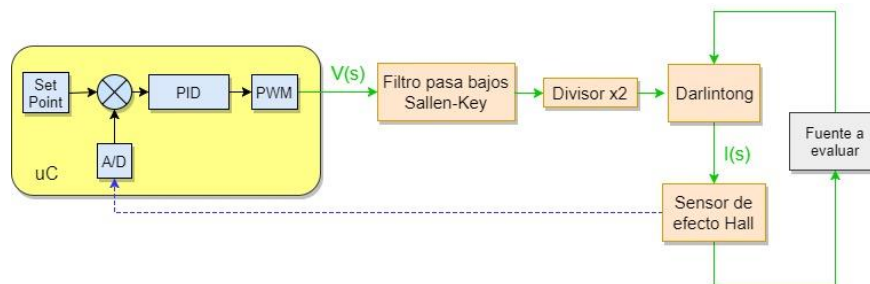


Imagen 2: diagrama en bloques del circuito de control PID

Como bloques principales se distinguen:

- El microcontrolador **uC**, encargado de muestrear la señal producida por el sensor de efecto Hall y calcular el valor de duty (0 a 1023 - 0 a 100%) de salida del PWM mediante un control PID.

- **Filtro pasa bajos Sallen-Key**, diseñado para obtener el valor medio de tensión de la onda cuadrada de PWM entregada por el microcontrolador. La imagen 3 muestra el esquema eléctrico implementado.

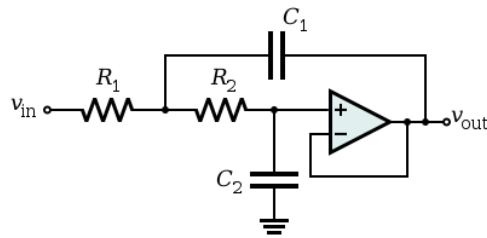


Imagen 3: esquema eléctrico filtro pasa bajos Sallen Key

- El **divisor por dos (x2)** es un divisor resistivo que reduce la tensión aplicada al circuito Darlington a la mitad para aumentar la resolución (0 a 2,5V, en saltos de 2,4mV) y proteger la base de posibles valores que dañen y/o destruyan a los transistores. Las resistencias son de 10,5kΩ, 1% de tolerancia.
- **Darlington** es un agrupamiento de transistores en cascada utilizado para incrementar la corriente de salida con bajos valores de corriente de entrada. Posee ganancia e impedancia de entrada extremadamente grande. En este caso el conjunto está conformado por los transistores BC548C, TIP41C y 2N3055.
- El **sensor de efecto Hall** entrega en su salida una tensión proporcional a la corriente consumida por la carga electrónica. Comercialmente se adquiere en un pequeño circuito impreso con bornes de conexión, como se puede ver en la imagen 4.



Imagen 4: sensor de efecto Hall ACS771.

2.2.1- Modelización matemática del sistema: función de transferencia

La ecuación que representa matemáticamente el sistema de control viene dada por la relación entre la salida y entrada del sistema:

$$G(s) = \frac{I(s)}{V_{IN(s)}}$$

Siendo $I(s)$ la **corriente consumida por la carga electrónica** y $V_{IN(s)}$ la tensión de PWM entregada por el microcontrolador a una frecuencia de aproximadamente 11kHz. Matemáticamente se expresa la función de transferencia de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{I(s)}{I_{B1(s)}} \cdot \frac{I_{B1(s)}}{V_{2(s)}} \cdot \frac{V_{2(s)}}{V_{1(s)}} \cdot \frac{V_{1(s)}}{V_{IN(s)}}$$

En el modelo matemático, los transistores son enumerados como Q_1 , Q_2 y Q_3 a BC548C, TIP41C y 2N3055 respectivamente.

El factor $\frac{I(s)}{I_{B1(s)}}$ relaciona la corriente de salida con la de base del transistor Q_1 , esta función viene dada por la ganancia total del amplificador Darlington, que al estar funcionando en la zona lineal se tiene:

$$\frac{I(s)}{I_{B1(s)}} = (hfe_1 + 1)(hfe_2 + 1)(hfe_3 + 1)$$

$$\frac{I(s)}{I_{B1(s)}} \cong (hfe_1)hfe_2(hfe_3)$$

El factor $\frac{I_{B1(s)}}{V_{2(s)}}$ relaciona la corriente de base del transistor BC548C con la tensión de salida del filtro pasa bajos Sallen Key $V_{2(s)}$. Para obtener esta expresión se plantea lo siguiente:

Debido a que los transistores en todo momento funcionan en su zona lineal y la corriente de base del transistor Q_1 es extremadamente pequeña respecto a la corriente a controlar (esperada de 0,5A a 3A), se expresa matemáticamente la corriente de cada transistor en función de la base del BC548C reemplazando cada juntura por su resistencia hie .

El factor queda expresado:

$$\frac{I_{B1(s)}}{V_{2(s)}} = \frac{1}{hie_1 + (hie_2)(hfe_1 + 1) + (hie_3)(hfe_1 + 1)(hfe_2 + 1) + R_{sh}(hfe_1 + 1)(hfe_2 + 1)(hfe_3 + 1)}$$

$$\frac{I_{B1(s)}}{V_{1(s)}} \cong \frac{1}{hie_1 + (hie_2)(hfe_1) + (hie_3)(hfe_1)(hfe_2) + R_{sh}(hfe_1)(hfe_2)(hfe_3)}$$

El factor $\frac{V_{2(s)}}{V_{1(s)}}$ relaciona la tensión de salida y entrada del divisor resistivo, formado por dos resistencias iguales, donde su función es:

$$\frac{V_{2(s)}}{V_{1(s)}} = \frac{R}{R + R} = \frac{R}{2R}$$

$$\frac{V_{2(s)}}{V_{1(s)}} = \frac{1}{2}$$

Para el filtro pasabajos, siendo $V_{1(s)}$ y $V_{IN(s)}$ la tensión de entrada y salida, la función de transferencia del filtro es:

$$\frac{V_1}{V_{IN}} = \frac{1}{1 + C_2(R_1 + R_2)s + C_1C_2R_1R_2s^2}$$

La función de transferencia del sistema, expresando la relación entre la corriente a controlar y la tensión de entrada es la siguiente:

$$G(s) = \frac{I(s)}{V_{IN(s)}} = \frac{I(s)}{I_{B1(s)}} \frac{I_{B1(s)}}{V_{2(s)}} \frac{V_{2(s)}}{V_{1(s)}} \frac{V_{1(s)}}{V_{IN(s)}}$$

$$G(s) = \frac{(hfe_1)hfe_2(hfe_3)}{(2)[hie_1+(hie_2)(hfe_1)+(hie_3)(hfe_1)(hfe_2)+R_{sh}(hfe_1)(hfe_2)(hfe_3)] 1+C_2(R_1+R_2)s+C_1C_2R_1R_2s^2} \cdot 1$$

2.2.2- MATLAB

Los análisis realizados en el software MatLab se dividen en dos partes: análisis en variable continua 's' y análisis en campo discreto 'z'. Los valores de **hfe** y **hie** de cada transistor fueron valores obtenidos de hojas de datos a excepción de los transistores TIP41C y 2N3055 que fueron estimados. A continuación, se muestra el código usado en MatLab y las gráficas más importantes con el fin de obtener conclusiones del funcionamiento del sistema.

Como primer paso se dan variables y función de transferencia.

```
clc;

hie1=10000;
hie2=1000;
hie3=100;
hfe1=800;
hfe2=75;
hfe3=70;
Rs = 1.2e-3;
R1 = 47e3;
R2 = 3.9e3;
C1 = 10e-9;
C2 = C1;

A = 1/(R1*R2*C1*C2);
B = (1/C1)*((1/R1)+(1/R2));
C = hie1+(hfe1+1)*hie2+(hfe1+1)*(hfe2+1)*hie3+(hfe1+1)*(hfe2+1)*(hfe3+1)*Rs;
D = (hfe1+1)*(hfe2+1)*(hfe3+1);
K = 0.5*((D*A)/C); % 0.5 representa las resistencias R20 y R21
```

Se realiza análisis a lazo abierto, en campo continuo (variable s).

```
G_num = [K];
G_den = [1 B A];
G = tf(G_num,G_den)
bandwidth(G)
figure(1);
step(G); % Rta escalón unitario
z = roots(G_num) % Obtención de ceros
p = roots(G_den) % Obtención de polos
figure(2);
pzmap(G); % Diagrama de polos y ceros
figure(3);
bodeplot(G); % Diagrama de Bode
```

Seguido, se realiza el análisis a lazo abierto en campo discreto (variable z).

```
fs = 10e3; % Frecuencia de muestreo
[G_num_z,G_den_z] = c2dm(G_num,G_den,1/fs,'zoh');
figure(4);
dstep(G_num_z,G_den_z,100); % Rta escalon unitario
G_z = tf(G_num_z,G_den_z)
z_z = roots(G_num_z) % Obtención de ceros
p_z = roots(G_den_z) % Obtención de polos
figure(5);
pzmap(G_z); % Diagrama de polos y ceros
figure(6);
bodeplot(G_z); % Diagrama de Bode
```

Se aplica el control PID para análisis a lazo cerrado, en campo continuo (variable s).

```
Kd_z = 0
Kp_z = 5
Ki_z = 10000

PID_num_ = [Kd_z Kp_z Ki_z];
PID_den_ = [1 0];

[PID_den_z,PID_num_z] = c2dm(PID_den_,PID_num_,1/fs,'zoh');
G_PID_num_z = conv(G_num_z,PID_num_z);
G_PID_den_z = conv(G_den_z,PID_den_z);
[G_PID_num_z_c,G_PID_den_z_c] = cloop(G_PID_num_z,G_PID_den_z);
G_PID_z_c = tf(G_PID_num_z_c,G_PID_den_z_c)
figure(11);
dstep(G_PID_num_z_c,G_PID_den_z_c,20); % Rta escalon unitario
figure(12);
pzmap(G_PID_z_c); % Diagrama de polos y ceros
figure(13);
bodeplot(G_PID_z_c); % Diagrama de Bode
figure(14);
nyquist(G_PID_z_c); % Nyquist
```

El mismo análisis se realiza en campo discreto (variable z).

```
Kd = 0
Kp = 7
Ki = 14000

PID_num = [Kd Kp Ki];
PID_den = [1 0];
G_PID_num = conv(G_num,PID_num);
G_PID_den = conv(G_den,PID_den);
G_PID = tf(G_PID_num,G_PID_den);
[G_PID_num_c,G_PID_den_c] = cloop(G_PID_num,G_PID_den);
G_PID_c = tf(G_PID_num_c,G_PID_den_c)
figure(7);
step(G_PID_c,0:.000001:.001)
figure(8);
pzmap(G_PID_c); % Diagrama de polos y ceros para bucle cerrado
figure(9);
bodeplot(G_PID_c); % Diagrama de Bode
figure(10);
nyquist(G_PID_c); % Nyquist
```


2.2.2.1- Análisis a lazo abierto: campo continuo

Diagrama de Bode

La frecuencia de corte del sistema es en aproximadamente 2000 rad/s siendo ésta la frecuencia de corte del filtro pasa bajo del sistema. La función `bodeplot(G)` realiza el gráfico de Bode (amplitud y fase), mostrado en imagen 5.

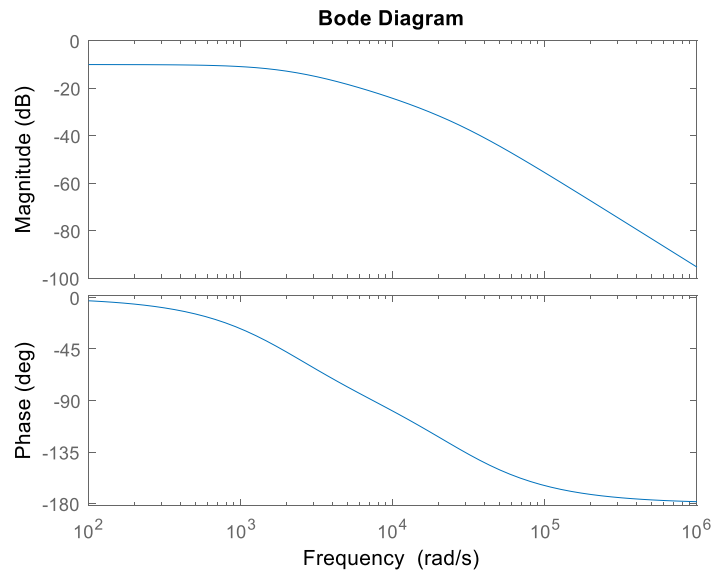


Imagen 5: diagrama de Bode del sistema

2.2.2.2- Análisis a lazo cerrado: campo continuo

Se aplica un control PI, con valores de $k_p = 7$ y $k_i = 14000$.

Respuesta a escalón unitario

Se realiza la respuesta al escalón unitario del sistema a lazo cerrado como se puede observar en la imagen 6.

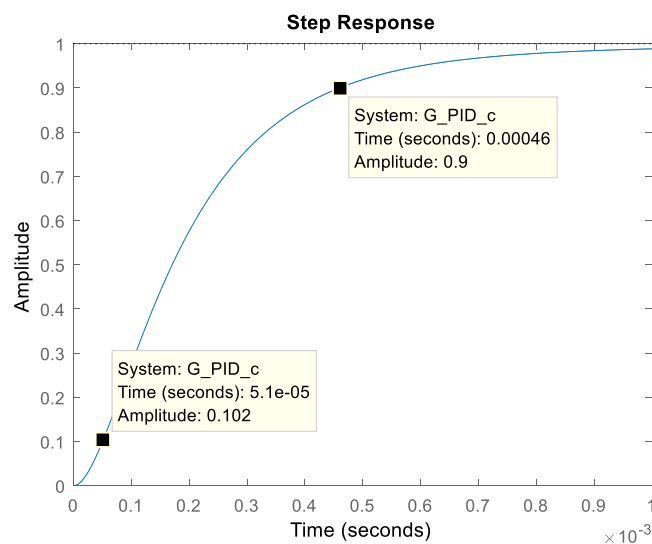


Imagen 6: respuesta a función escalón

Analizando, el tiempo de crecimiento es de $400\mu\text{s}$ y el tiempo de establecimiento es aproximadamente de 1ms .

Diagrama de polos y ceros

Se realiza la gráfica de polos y ceros de la función de transferencia en campo continuo a lazo cerrado. La función posee un cero en $c_1 = [-2 \times 10^3 \text{s}^{-1}]$ y posee tres polos en $p_1 = [-1,92 \times 10^3 \text{s}^{-1}]$, $p_2 = [-6,4 \times 10^3 \text{s}^{-1}]$ y en $p_3 = [-1,94 \times 10^4 \text{s}^{-1}]$. Como todos los polos se encuentran en el eje real negativo el sistema es estable y sobre-amortiguado ya que se encuentran sobre el eje real.

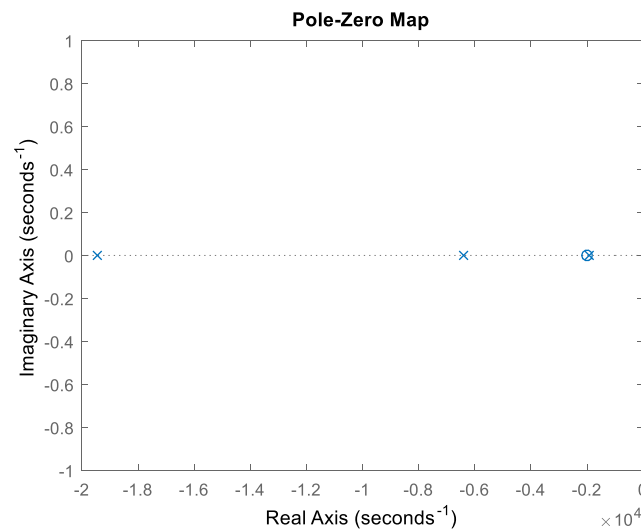


Imagen 7: diagrama de polos y ceros de función de transferencia

Diagrama de Bode

Se puede observar que el ancho de banda del sistema es aproximadamente 5500 rad/s .

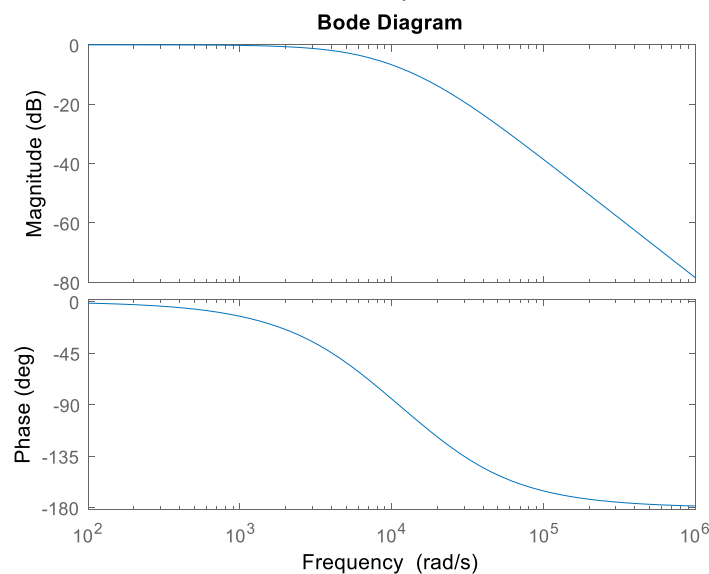


Imagen 8: diagrama de Bode del sistema

Diagrama de Nyquist

Se realiza el diagrama de Nyquist.

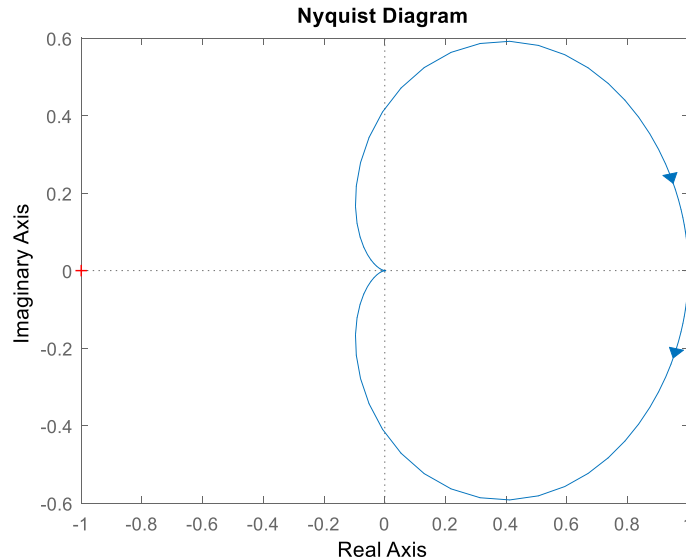


Imagen 9: diagrama de Nyquist del sistema

2.2.2.3- Análisis a lazo cerrado: campo discreto

Se discretiza el sistema con una frecuencia de 10KHz, valor utilizado para el muestreo de corriente a controlar. Se le aplica un control PI con valores de $k_p = 5$ y $k_i = 10000$.

Respuesta escalón unitario

En comparación con la respuesta en campo continuo, los valores de K_p y K_i son muy similares. Analizando el gráfico 10, el tiempo de establecimiento es mayor que en el de campo continuo.

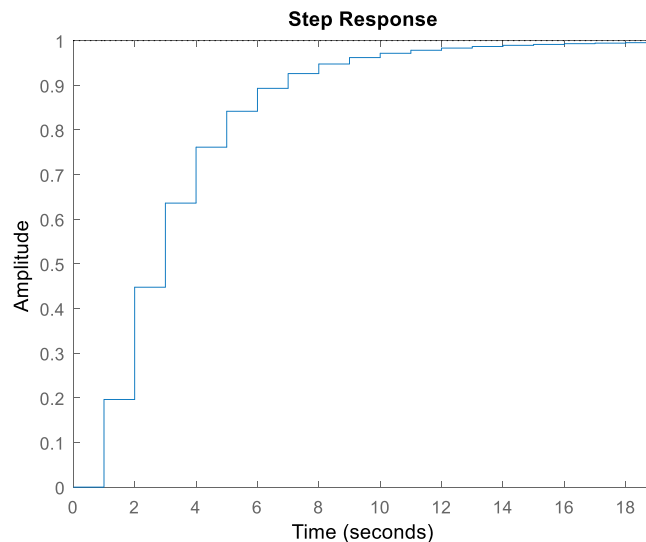


Imagen 10: respuesta a función escalón

Diagrama de polos y ceros

La función posee dos ceros en $c_1 = [0,819s^{-1}]$ y $c_2 = [-0,41s^{-1}]$ y tres polos en $p_1 = [0,83s^{-1}]$, $p_2 = [0,603s^{-1}]$ y en $p_3 = [0,256s^{-1}]$. Aunque los polos estén ubicados en el eje real en este caso son positivos, pero al ser menores a 1 (uno) el sistema es estable y, tal como se analizó en campo continuo, los polos se encuentran sobre el eje real siendo un sistema sobre-amortiguado.

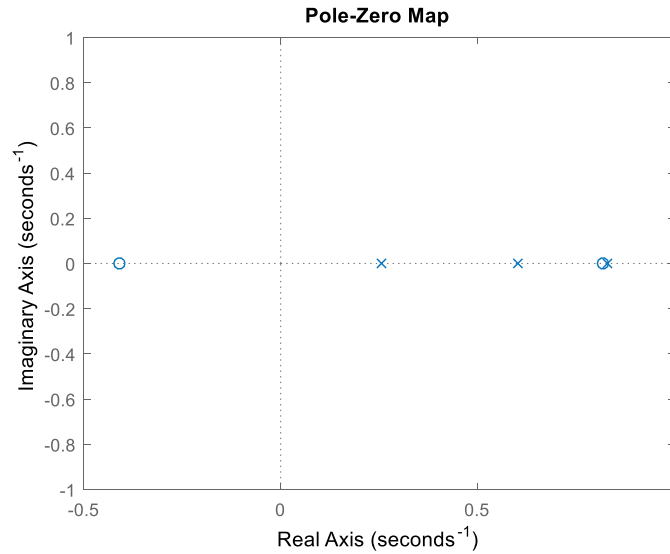


Imagen 11: diagrama de polos y ceros de función de transferencia

Diagrama de Bode

El ancho de banda del sistema se redujo al discretizar el sistema a aproximadamente 0,3 rad/s. Se observa el diagrama de Bode en la imagen 12.

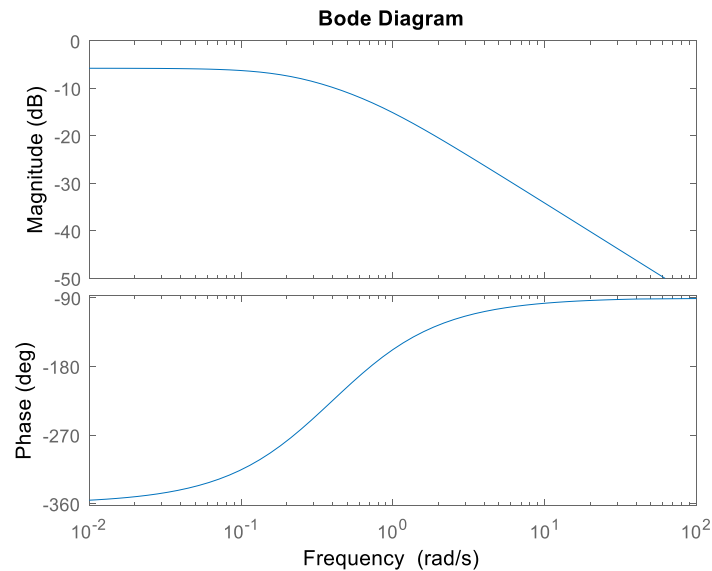


Imagen 12: diagrama de Bode del sistema

Diagrama de Nyquist

Se realiza el diagrama de Nyquist.

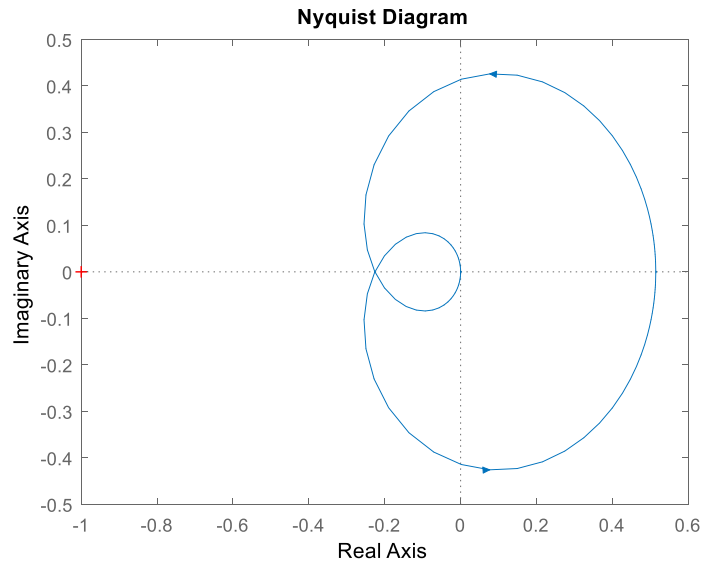


Imagen 13: diagrama de Nyquist del sistema

2.2.3- Implementación de PID

El software de la carga electrónica cuenta con el algoritmo de corrección PID que se muestra en la imagen 14.

```

Data.PID.Error = Data.Current.ADCSetPoint - Data.Current.ADC; // Cálculo de error
Data.PID.Integral += Data.PID.Ki*(float)Data.PID.Error*SAMPLING_PERIOD; // Cálculo de valor integral
Data.PID.Duty = Data.PID.Kp*Data.PID.Error + (int16_t)Data.PID.Integral; // Se obtiene el nuevo valor de duty
if(Data.PID.Duty <= 0) // Se limita el valor entre 0 y 1023
{
    Data.PID.Duty = 0;
}
if(Data.PID.Duty >= 1023)
{
    Data.PID.Duty = 1023;
}
PWM_SetDuty(Data.PID.Duty); // Se actualiza el valor de duty
    
```

Imagen 14: algoritmo PID, para $K_p=1$, $K_i=100$ y $K_d=0$

Se calcula el error como la diferencia entre el valor del **Set Point** (en lectura de ADC) y el valor medido del sensor. Se obtiene el **integral** como la suma de su valor anterior y el valor del **error** multiplicado por el **período de muestreo** y la constante integradora **Ki**. El **duty** se obtiene sumando el valor **integral** anteriormente calculado con el producto entre el **error** y la constante proporcional **Kp**. Tal como se observó en el análisis de MatLab, el valor de **Kd** es cero (0).

La señal de salida del sensor de efecto Hall es muestreada con una **frecuencia de 10kHz**. Los valores de **Kp** y **Ki** fueron obtenidos bajo experiencias prácticas partiendo de los obtenidos en la modelización en MatLab. Dadas las limitaciones de procesamiento en un microcontrolador, los valores de **Kp** y **Ki** obtenidos para una estabilización de la corriente son **1** y **100**, respectivamente.

En serie con la carga electrónica se monta una resistencia de $4,7\Omega$, donde se toma la caída de tensión para mostrar en el osciloscopio. La imagen 15 muestra la respuesta al estado transitorio de 0A a 1A de consumo.

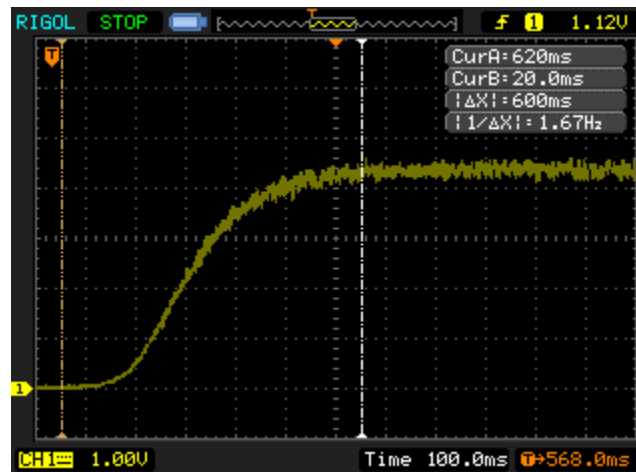


Imagen 15: respuesta de 0A a 1A

Analizando, la estabilización se produce en aproximadamente $600ms$. La imagen 16 muestra la respuesta al cambio de Set Point de 0,5A a 1A.

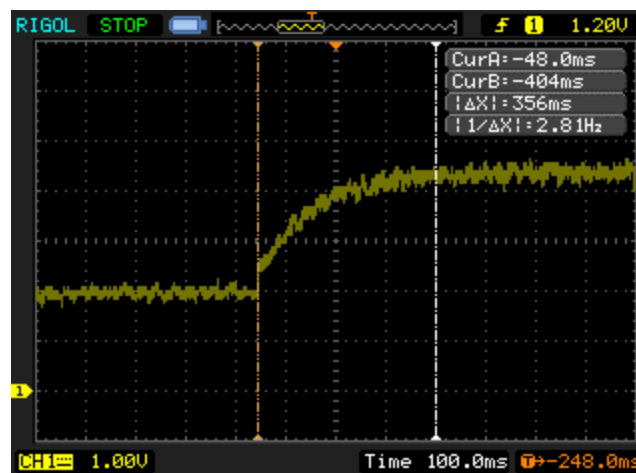
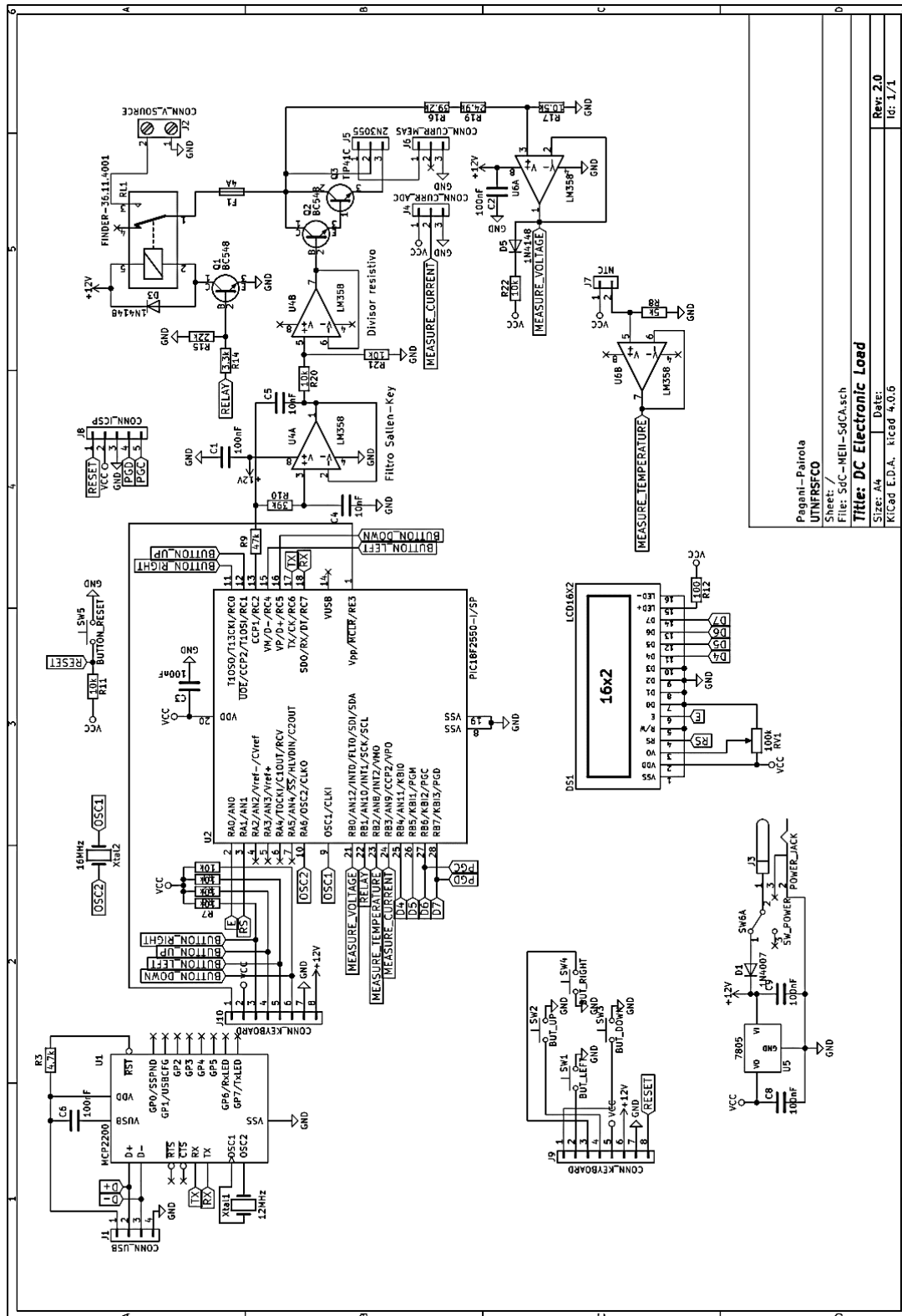


Imagen 16: respuesta de 0,5A a 1A

2.3- Hardware

El diseño del PCB ha sido realizado con el software KiCad, desde su esquema eléctrico (imagen 17) hasta el circuito impreso (imagen 18). Ambos se adjuntan a continuación.



Pagani-Pairola
UTNFRSFCO

Sheet: /
File: SdC-MEI-SdCA.sch

Title: DC Electronic Load

Size: A4 Date:

Rev: 2.0

Id: 1/1

Kicad E.D.A. kicad 4.0.6

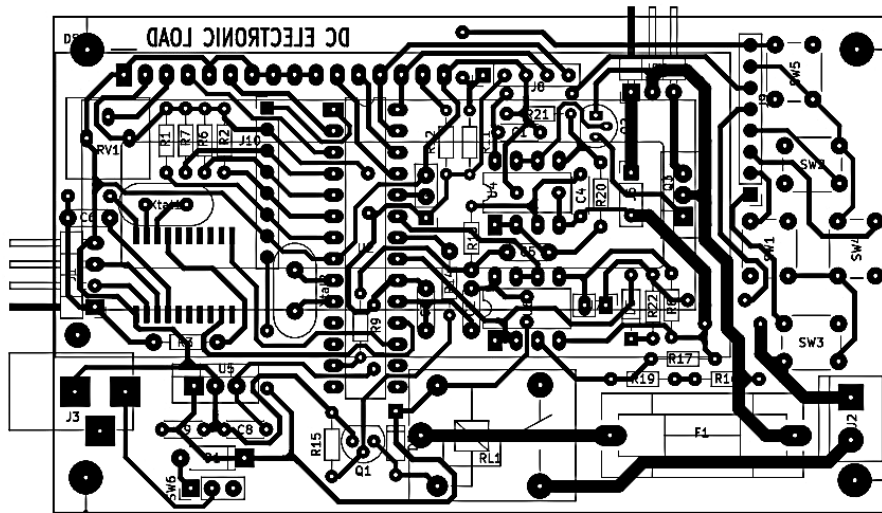


Imagen 18: PCB de carga electrónica

La imagen 19 muestra una fotografía de la carga electrónica.

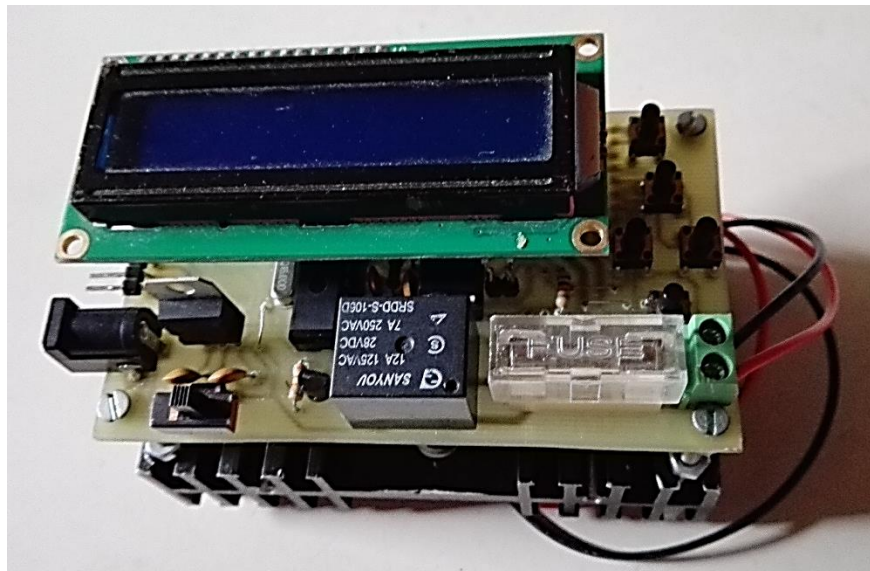


Imagen 19: fotografía de la carga electrónica

2.4- Software

El desarrollo del firmware del microcontrolador PIC ha sido desarrollado con las herramientas de programación provista por Microchip:

- IDE: MPLAB X (v3.55).
- Compilador: XC8 (v1.42).

2.4.1- Estructuración

El firmware ha sido estructurado como una máquina de estados, donde cada uno se describe en la tabla 1.

Tabla 1: estados del programa del microcontrolador

Estado	Tareas
<i>State_Start</i>	<ul style="list-style-type: none"> Se visualiza pantalla principal al encender la carga.
<i>State_PushLeftButton</i>	<ul style="list-style-type: none"> Se espera a presionar el pulsador izquierdo del teclado para ingresar al menú.
<i>State_CheckButtons</i>	<ul style="list-style-type: none"> Se analiza estado de pulsadores para mostrar el cursor correspondiente (un cursor es la denominación a la segunda fila mostrada en el LCD, representa el dato –corriente seteada, medida, tensión, potencia, etc- visualizado).
<i>State_CheckVariables</i>	<ul style="list-style-type: none"> Se analizan variables modificadas ante muestreo de señal y recepción de datos de PC, siendo: <ul style="list-style-type: none"> Total de muestras realizado, para promediar y obtener valores de corriente, tensión y potencia para visualización. Datos de Kp, Ki, temperatura máxima y tensión mínima recibidos.
<i>State_CheckCursor</i>	<ul style="list-style-type: none"> Los cursores disponibles son: <ul style="list-style-type: none"> <i>Cursor_Start</i>: encendido o apagado de la carga. <i>Cursor_SetCurrent</i>: modificación de valor de corriente a controlar. <i>Cursor_MeasCurrent</i>: visualización de corriente medida. <i>Cursor_Voltage</i>: visualización de tensión aplicada por fuente a evaluar. <i>Cursor_Power</i>: potencia disipada por la carga. <i>Cursor_Resistance</i>: resistencia simulada por la carga. <i>Cursor_MinVoltage</i>: voltaje de corte (default: 1,2V). <i>Cursor_Temperature</i>: visualización de temperatura de disipador. <i>Cursor_MaxTemperature</i>: temperatura máxima del disipador. <i>Cursor_PID_Kp</i>: visualización de constante de proporción de control PID. <i>Cursor_PID_Ki</i>: visualización de constante de integración de control PID.
<i>State_CheckVoltage</i>	<ul style="list-style-type: none"> Compara la tensión de la fuente conectada para evaluar con el valor mínimo de corte.
<i>State_CheckTemperature</i>	<ul style="list-style-type: none"> Muestrea y transforma la señal producida por la NTC en valores de grados centígrados. Compara la temperatura medida con el valor máximo.
<i>State_Protection</i>	<ul style="list-style-type: none"> Ante tensión mínima, alta temperatura en disipador y recepción de nuevos valores de Kp y Ki se reinicia la carga con los valores correspondientes.

2.4.2- Interrupciones

Se cuenta con dos interrupciones de programa principales:

- Interrupción de muestreo (*SAMPLING_FLAG*)** a una frecuencia de 10kHz, para muestreo de corriente y tensión y corrección de salida mediante algoritmo de control PID.

- 2- Interrupción ante recepción de datos (*RECEPCION_FLAG*) para modificación de los valores K_p , K_i , tensión mínima y temperatura máxima.

2.4.3- USB

El circuito integrado utilizado para facilitar el intercambio de datos con el PC es el MCP2200 de la firma Microchip. Emula un puerto serie (COM) permitiendo enviar y recibir los siguientes datos en el formato que se detalla en la tabla 2.

Tabla 2: formato de datos enviados entre microcontrolador y PC

Dato	Enviado desde PC	Enviado desde uC
Nuevos parámetros K_p y K_i para algoritmo de control PID.	$\langle *K_p, K_i \rangle$ inicia con asterisco (*) y finaliza con punto y coma (;), separando ambos números con coma (,).	$\langle R \rangle$ el dato ha sido recibido. $\langle P \rangle$ el dato ha sido procesado.
Nuevo valor de tensión mínima para apertura de carga.	$\langle V_{v_{min}} \rangle$ inicia con (V) y finaliza con punto y coma (;).	
Nuevo valor de temperatura máxima para apertura de carga.	$\langle T_{t_{max}} \rangle$ inicia con (T) y finaliza con punto y coma (;).	

2.5. Mediciones y contrastaciones

2.5.1- Corriente

Dada la necesidad de controlar la corriente consumida de la fuente a evaluar, se decide utilizar un sensor de efecto Hall para la obtención de valores de esta magnitud eléctrica.

2.5.1.1- Sensor efecto Hall

La firma Allegro dispone del sensor ACS712ELCTR-05B-T, con un rango de $\pm 5A$ y una sensibilidad de 185 mV/A , conformado internamente por el diagrama en bloques de la imagen 18.

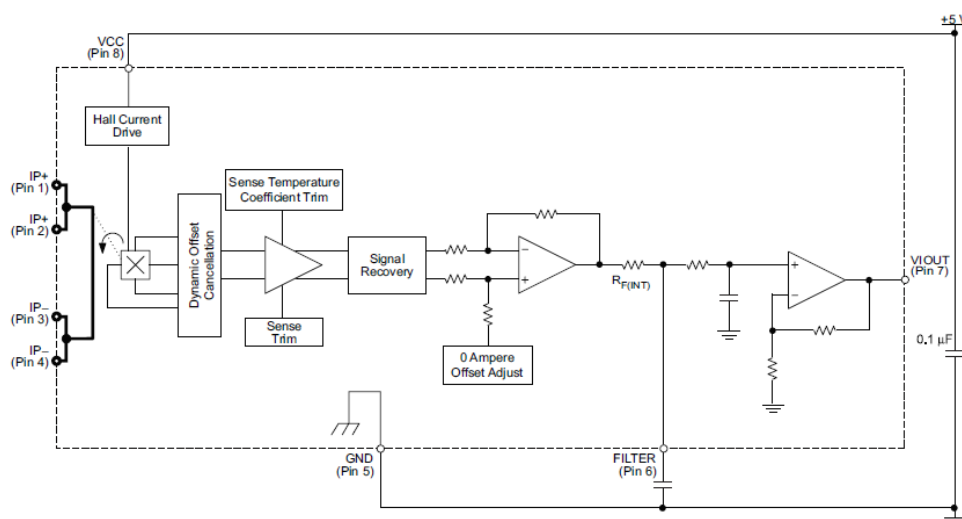


Imagen 20: Diagrama en bloques del sensor ACS71

Ante ausencia de corriente la tensión de salida es la mitad de la tensión de alimentación (2,5V en la carga electrónica). La aplicación típica está descrita en la imagen 21.

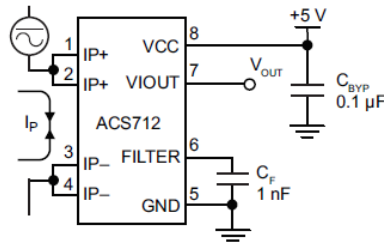


Imagen 21: Nota de aplicación sensor ACS71.

La sensibilidad del sensor se puso en discusión en las primeras mediciones de corriente realizadas. Debido a esto se decide realizar un pequeño ensayo con el fin de verificar la veracidad de los datos provistos por el fabricante, obteniendo como resultado el gráfico 1.

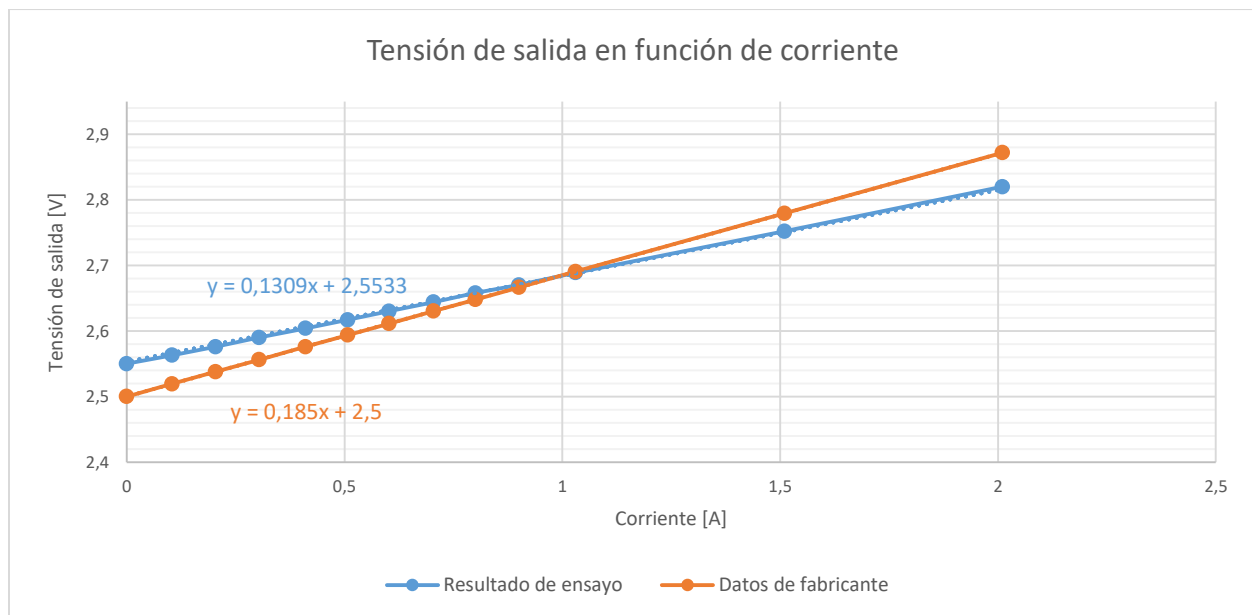


Gráfico 1: comparación entre datos obtenidos con ensayo y datos por fabricante

Comparando ambas rectas generadas a partir de las mediciones realizadas se destaca una considerable diferencia entre las pendientes de ambas. Durante el ensayo la medición de corriente y tensión fue realizada con el multímetro **FLUKE 289** y **FLUKE 114** respectivamente, ambos provistos por el laboratorio CIDEME.

2.5.1.2- Contrastación

Utilizando como instrumento patrón el multímetro **GW Instek GDM-356**, para un valor de tensión de fuente fijo; 20V, el gráfico dos (2) muestra la corriente contrastada en función del error absoluto.

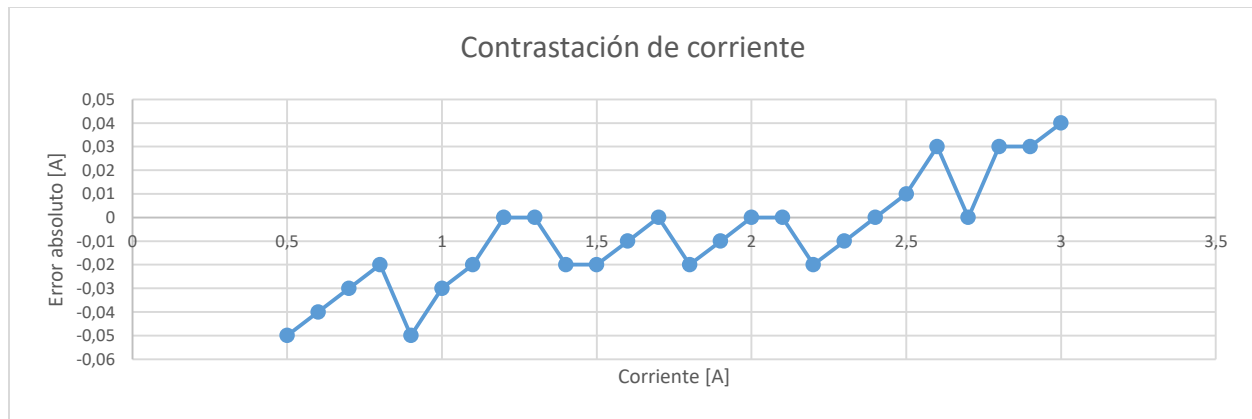


Gráfico 2: contrastación de corriente

2.5.2- Tensión

La medición de tensión es realizada mediante un divisor resistivo conformado por tres (3) resistencias de 1% de tolerancia. La resistencias son de $39,2k\Omega$, $24,9k\Omega$ y $10,5k\Omega$, tomando sobre ésta última el valor de tensión a muestrear por el microcontrolador, previamente adaptada por un amplificador operacional.

2.5.2.1- Contrastación

Utilizando como instrumento patrón el multímetro **GW Instek GDM-356**, para un valor de corriente fija; 1A. El gráfico tres (3) muestra la tensión en función del error absoluto.

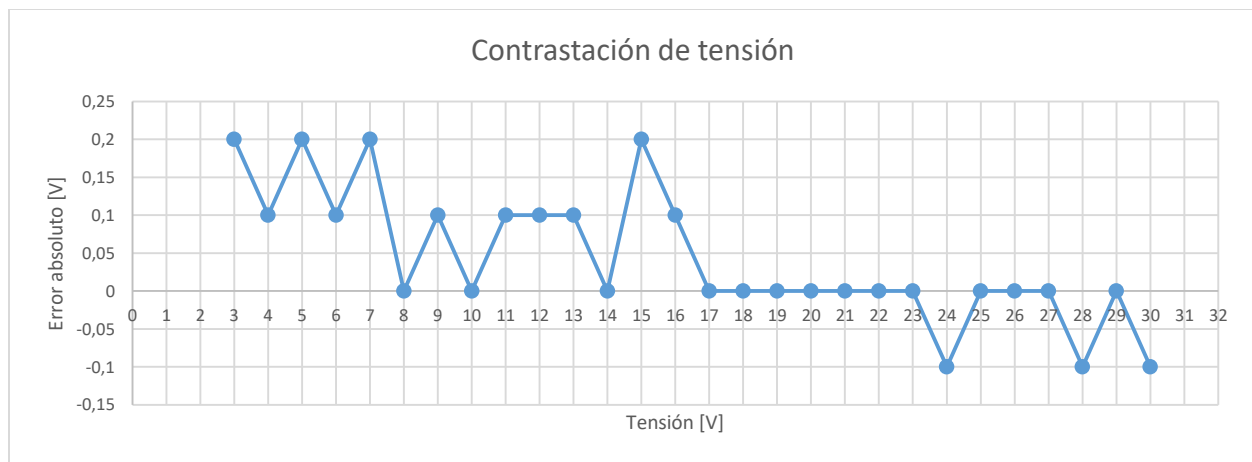


Gráfico 3: contrastación de tensión

2.5.3- Potencia

Para la contrastación de la medición de potencia no se contó con un vatímetro patrón capaz de medir pequeñas potencias, por esta razón se realizó una medición **indirecta**: se tomaron como instrumentos patrones los multímetros **GW Instek GDM-356** y **Brymen BM817**, utilizados para la medición de corriente y tensión, respectivamente. El objetivo de la contrastación fue determinar el grado de fidelidad de la medición de potencia por parte de la carga electrónica, detectando posibles causantes de errores y planificar mejoras para obtener las correcciones.

Tomando como valor verdadero o convencional el obtenido por los instrumentos patrones y como valor medido el de la carga obtenemos el error absoluto expresado en el gráfico cuatro (4).

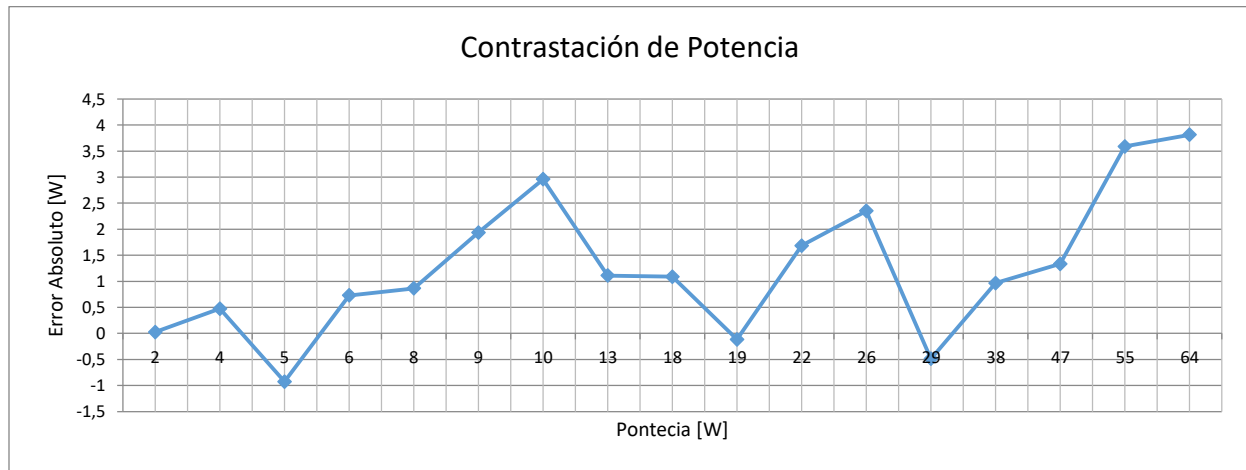


Gráfico 4: contrastación de potencia

El mayor valor de potencia medido, a 30V y 2,3A, es 69W. Por seguridad no se realizó el ensayo de contrastación aplicando 3A a 30V ya que los componentes de potencia podrían dañarse.

2.5.4- Resistencia

La magnitud de resistencia que indica la carga electrónica en su HMI es la simulada a la fuente conectada a evaluar.

Para la contrastación de resistencia se realizó lo mismo que con la de potencia; una medición indirecta como el cociente entre la medición de tensión aplicada a la carga y la corriente consumida.

Tomando como valor verdadero o convencional el obtenido por los instrumentos patrones y como valor medido el de la carga, obtenemos el error absoluto expresado en el gráfico cinco (5).

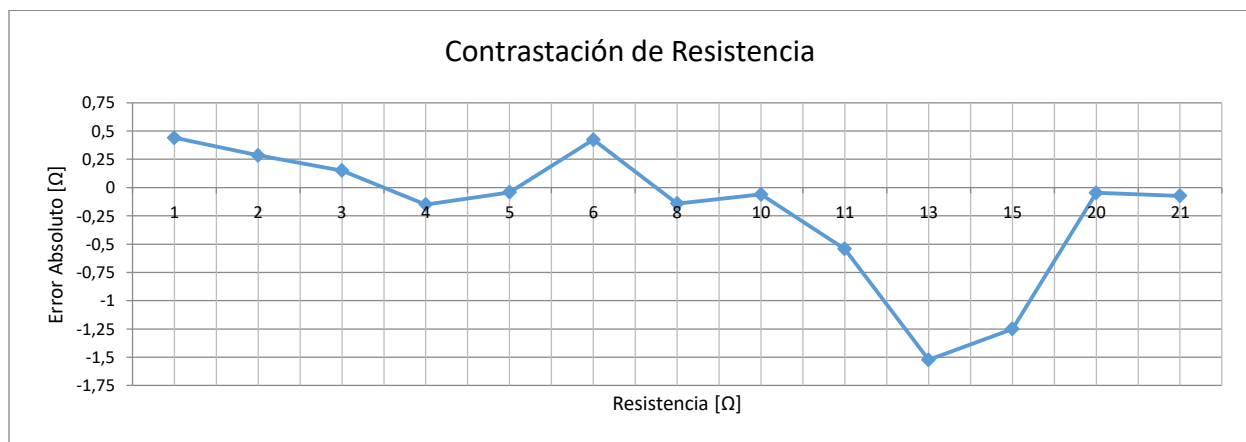


Gráfico 5: contrastación de resistencia

2.5.5- Temperatura

El termistor NTCALUG02A502G de la carga electrónica es el encargado de medir la temperatura del disipador utilizado para el transistor 2N3055. Este termistor posee como ecuación de transferencia:

$$R(T) = Ae^{\frac{B}{T}}$$

A: constante
B: índice de sensibilidad (3984°K)
T: temperatura [°K]

Las constante B viene dada por el fabricante y a partir de ésta se obtiene A, completando la función para el cálculo de temperatura. El cálculo de temperatura es realizado y comparado por el microcontrolador con un valor definido por el usuario de la carga electrónica. Ante sobretemperatura, la carga electrónica deja de funcionar protegiendo su circuito de posibles daños.

3- Conclusión

Como conclusión general se destaca el cumplimiento de los objetivos propuestos, resaltando **la creación de una carga electrónica capaz de consumir de una fuente de alimentación una corriente constante de 0,5A a 3A, proporcionando un valor de potencia consumida, contando con protecciones contra caídas de tensión y sobretemperatura.**

Desde el punto de vista del control de corriente, la modelización matemática del sistema permitió realizar simulaciones con el software MatLab, obteniendo un **sistema estable** y capaz de controlarse mediante un **control PID**. Al llevar este control a la práctica se encontraron diferencias entre los valores numéricos de las constantes **proporcional** e **integradora** dadas las limitaciones del procesamiento del microcontrolador. Más allá de estas diferencias, los resultados fueron positivos ya que se concretó el control buscado.

Analizando las mediciones realizadas por el instrumento (corriente, tensión y potencia) **la carga carece de exactitud para ser un instrumento de medición de potencia confiable**. Su aplicación como instrumento de medición es **recomendada para tener una idea aproximada del consumo realizado**.