

**Título proyecto**

IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL PID EN PROTOTIPO DE BANDA TRANSPORTADORA CON VELOCIDAD CONSTANTE INDEPENDIENTE DE LA VARIACIÓN DEL PESO

**Integrantes**

Nombre	Código
NEIL SEBASTIAN CASTRO CAICEDO	U00131867
HUBERT ARMANDO DELGADO MAESTRE	U00091396
JHAN CARLOS RUDA PRADA	U00130452

**Objetivo General**

Diseñar un controlador PID para una banda transportadora, con el propósito de mantener una velocidad constante y estabilizada, asegurando un transporte óptimo y seguro de elementos.

**Objetivos Específicos**

1. Realizar el mantenimiento a la banda transportadora ubicada en el laboratorio de automatización y acondicionamiento de un sensor para medir la velocidad.
2. Determinar el modelo matemático de la banda transportadora acoplada a un motor trifásico.
3. Diseñar el control PID para regular la velocidad lineal de la banda transportadora.
4. Diseñar una plataforma IoT que permita leer y cambiar la velocidad actual del sistema.

**Descripción del proceso**

En principio, la banda transportadora, debido a sus dimensiones y su caja reductora, se concibe para el transporte de alimentos, específicamente botellas de 1L con un peso neto de 1.108 kg y dimensiones de 9 cm x 9 cm x 30 cm. Para determinar la velocidad óptima de operación, se ha tomado como referencia modelos de bandas transportadoras comerciales con características y dimensiones similares a la banda transportadora actual. Tras revisar la oferta comercial en China, se llegó a la conclusión de que la velocidad de operación oscila aproximadamente entre 9 cm/s y 50 cm/s. [1]

En líneas generales, el proyecto se compone de una banda transportadora que se activa mediante un motor de corriente alterna (AC) conectado a un variador de frecuencia Siemens. Este variador tiene la capacidad de ajustar la frecuencia de la corriente alterna suministrada al motor, permitiendo un control preciso de su velocidad de rotación.

Con el fin de simplificar la operación del variador de frecuencia, se ha incorporado un módulo PWM que establece una relación entre el porcentaje de PWM de entrada y la frecuencia de salida. Además, se ha integrado un sensor de velocidad para monitorear de manera constante la velocidad de rotación de la banda transportadora.

**Variables a Controlar:**

La variable primordial a controlar es la velocidad lineal de funcionamiento de la banda, la cual debe ser mantenida constante incluso bajo diferentes cargas.

#### **Variables Manipuladoras:**

La variable principal a manipular en el sistema es el porcentaje de PWM, ya que constituye la señal de entrada a través del módulo PWM. Aunque también se tiene en cuenta la frecuencia que controla el variador, la relación entre estas dos variables destaca al porcentaje de PWM como la principal a ajustar y controlar.

#### **Señales de Perturbación:**

En cuanto a las señales de perturbación, al examinar las posibles influencias que podrían afectar el proceso, se destaca la variación en la carga transportada. Dado que la banda tiene la responsabilidad de llevar esta carga de un punto a otro, cualquier cambio en la carga puede influir en la velocidad del proceso.

### **Diseño mecánico**

Módulo reductor sin fin

Módulo de reductor de  
sinfín

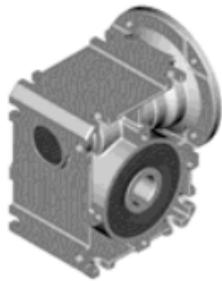


Figura 1. Módulo reductor.



Figura 2. Especificaciones Módulo reductor.

Posee una relación de engranajes en reducción de velocidad de 1/40 veces

La banda transportadora cuenta con guías laterales, inferiores y superiores. Durante el desarrollo del proyecto, se realizaron rediseños y se fabricaron nuevos soportes inferiores, además de ajustes en los laterales. Estas modificaciones fueron necesarias para garantizar el correcto funcionamiento del mecanismo, ya que las guías existentes generaban obstrucciones que podrían dañar los eslabones de la banda, que están tensionados al montarse en ella.



Figura 3. Soportes previos en las guías.

Se llevó a cabo un dimensionamiento de los soportes inferiores, considerando variantes internas y externas, que posteriormente se segmentan en medidas de aproximadamente 20 cm cada una.

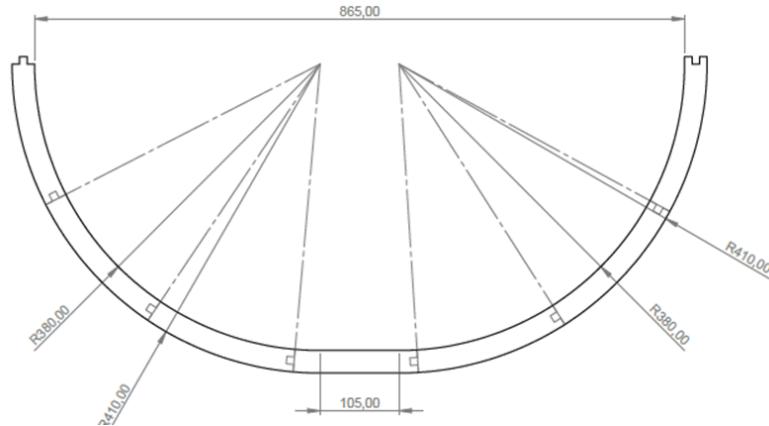


Figura 4. Soportes externos rediseñados.

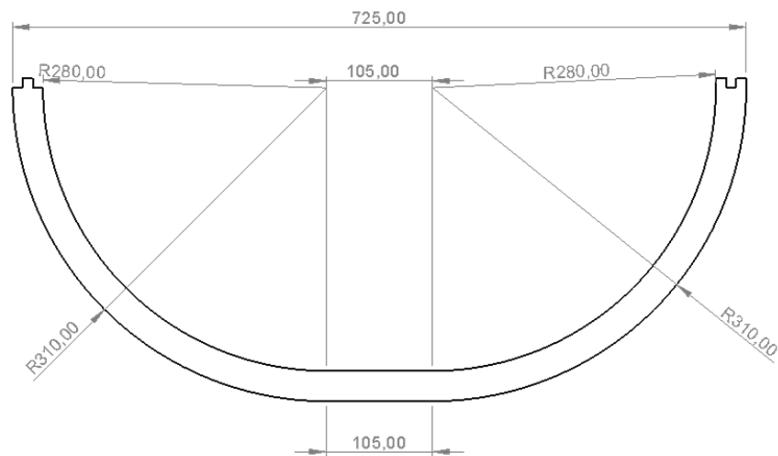


Figura 5. Soportes internos rediseñados.

Para la fabricación de las piezas, se imprimen los segmentos dimensionados a escala 1:1, utilizando estos como moldes para manufacturar las piezas finales en el material seleccionado, UHMW.

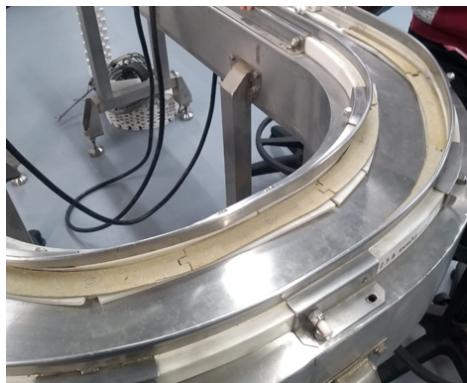


Figura 6. Moldes soportes inferiores.

Se llevaron a cabo simulaciones de análisis estático con el objetivo de asegurar la integridad y resistencia de las piezas en diversas condiciones. Esto se hizo para evitar repetir el error de diseño observado en las anteriores piezas, las cuales fueron fabricadas en línea recta y posteriormente curvadas aplicándoles tensión axial. Esta acción provocó su deformación hasta llegar a la falla por fatiga. Se proporciona un análisis más detallado en el Anexo 1.

Con el fin de integrar el sensor en la máquina, se ideó y produjo un acople, acompañado de varios discos codificados con diferentes cantidades de pulsos.

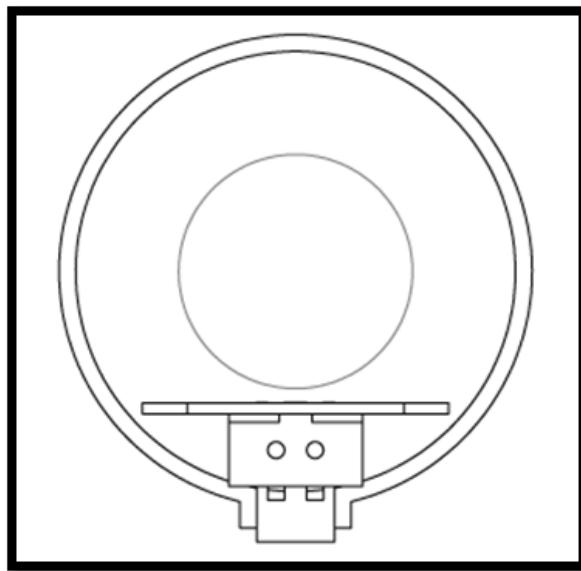


Figura 7. Diseño soporte encoder.

En cuanto al encoder, componente fundamental del proyecto, se concibió a partir del encoder comercial que se suministra de fábrica con el sensor de pulsos. En este proceso, se escaló el diámetro del encoder comercial de 2.5 cm a 5 cm, manteniendo el mismo alto y ancho para cada ranura. Este ajuste se realizó con el objetivo de asegurar la constancia en la generación de pulsos. Como resultado, la cantidad de pulsos por vuelta aumentó de 20 a 52.

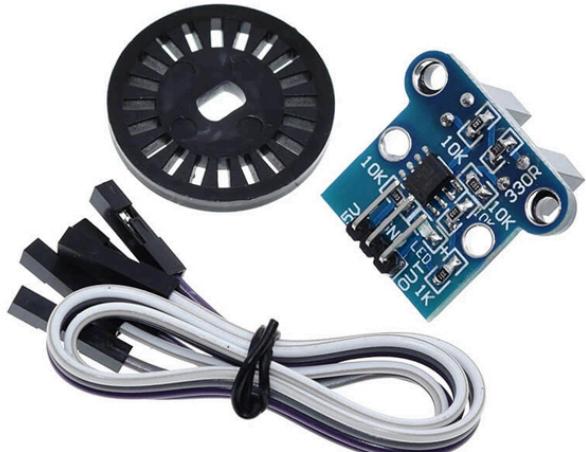


Figura 8. Encoder comercial de fabrica.

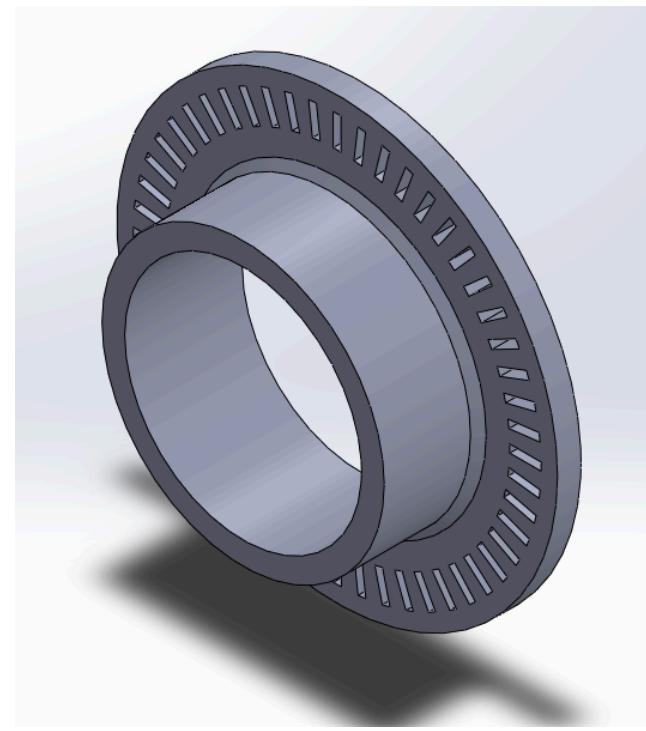


Figura 9. Encoder escalado 2:1.

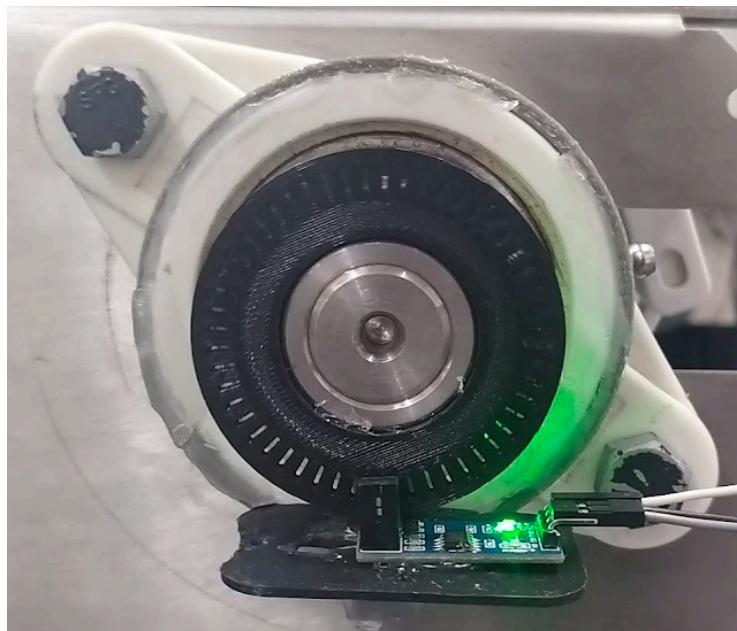


Figura 10. Montaje soporte sensor y encoder.

## Instrumentación y Actuadores

Dado que se está trabajando en un proyecto preexistente, el actuador ha sido previamente seleccionado por estudiantes que participaron en etapas anteriores. En esta fase, se utiliza un motor trifásico de jaula de ardilla simple Nord 63L/4, el cual está equipado con una caja reductora, como se ilustra en la Figura 11. Las especificaciones técnicas detalladas se encuentran precisamente descritas en la Figura 12.

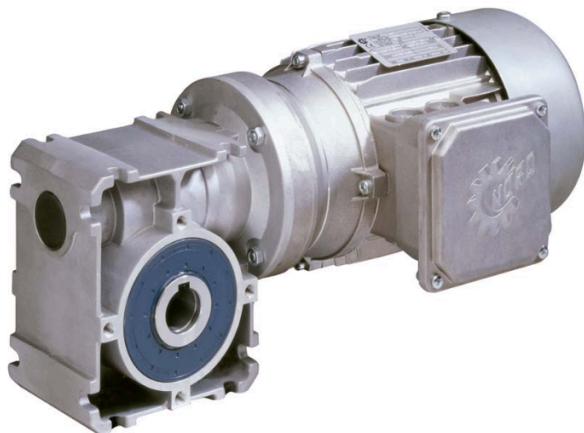


Figura 11. Motor Trifásico Nord 63L/4.



Figura 12. Especificaciones Técnicas Nord 63L/4.

Dado que el motor actuador ha sido previamente seleccionado, se deben considerar varios modos de arranque, entre los cuales se encuentran el arranque directo, el arranque por autotransformador, el arranque eléctrico y el arranque por variador de frecuencia. Sin embargo, debido a la necesidad no solo de encender el motor, sino también de controlar su velocidad, se ha optado por el método de arranque mediante variador de frecuencia. Esta elección se fundamenta en su facilidad de conexión con sistemas embebidos y en las garantías adicionales de seguridad que proporciona.

Con el tipo de arranque definido, se procede a seleccionar el variador de frecuencia adecuado, teniendo en cuenta la ficha técnica del motor preestablecido. En el laboratorio de automatización de la UNAB, se cuenta con varios variadores, y se han priorizado diversos criterios para la selección, tales como voltaje nominal, corriente nominal, potencia nominal y disponibilidad.

Para tomar esta decisión, se ha elaborado una matriz de despliegue de la función de calidad (QFD), considerando dos tipos de variadores trifásicos: los de alimentación monofásica y trifásica, como se detalla en la Tabla 1. Tras el análisis, se ha concluido que el variador SIEMENS V20 MONOFÁSICO TIPO B (ilustrado en la Figura 13) satisface de manera óptima los requisitos establecidos.

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demand Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")		
				SIEMENS V20 TIPO A SIN VENTILADOR TRIFASICO	SIEMENS V20 TIPO A CON VENTILADOR MONOFASICO	SIEMENS V20 TIPO B CON VENTILADOR MONOFASICO	
1	9	21.1	4.0	Voltaje nominal 254V	Θ	▲	▲
2	9	26.3	5.0	Corriente nominal 1.13 A	▲	○	○
3	9	26.3	5.0	Potencia nominal 0.21 Kw	○	○	○
4	3	26.3	5.0	Disponibilidad		○	○
				Max Relationship Value in Column	9	9	9
				Weight / Importance	294.7	415.8	573.7
				Relative Weight	23.0	32.4	44.7

Tabla 1. Matriz QFD para Selección Variador de Frecuencia.



Figura 13. Variador de Frecuencia Siemens V20.

Componente	Potencia nominal de salida	Corriente nominal de entrada	Corriente nominal de salida
Tamaño de bastidor B (con un ventilador)	1,1 kW	14,7 A	6,0 A
	1,5 kW	19,7 A	7,8 A

Tabla 2. Especificaciones técnicas SIEMENS V20 MONOFÁSICO TIPO B.

Después de la selección del variador de frecuencia, se presentan varias formas de utilización, destacando dos métodos principales: el control mediante botones y el control a través de pines analógicos. Dado el contexto de la integración de un sistema embebido en el proyecto, es esencial optar por el segundo método, que implica la utilización de pines.

Para establecer la conexión entre el sistema embebido y el variador de frecuencia, se requiere el uso de los pines digitales PWM de este último. A menudo, los sistemas embebidos operan con salidas digitales de 3.3V o 5V, mientras que el variador de frecuencia demanda señales PWM de 10V para su correcto funcionamiento. Por lo tanto, es imprescindible adquirir un módulo PWM de 10V, independientemente del sistema embebido elegido. Este módulo es esencial para elevar las señales PWM a 10V y así utilizar el variador de frecuencia de manera adecuada.

Tras una búsqueda en productos comerciales, se identificó un único módulo PWM de 10V disponible en venta. Al revisar su hoja técnica, se concluyó que era el dispositivo adecuado para el propósito previsto. Por lo tanto, se optó por utilizar un módulo PWM 0-10V, como se muestra en la Figura 14.

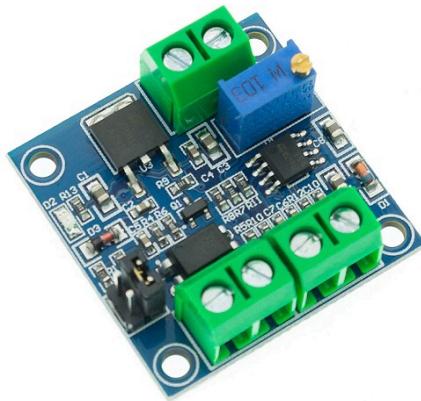


Figura 14. Conversor de PWM a 10V.

<i>Voltaje de alimentación:</i>	12 a 30 VDC
<i>Consumo de corriente:</i>	>100 mA
<i>Frecuencia del receptor PWM:</i>	1 a 3 KHz
<i>Rango de conversión:</i>	Señal pwm 0 -100% Salida: señal análoga 0 a 10 V (ajustable por potenciómetro)
<i>Error permitido:</i>	5%

Tabla 3. Especificaciones técnicas de conversor de PWM a 10V.

Considerando la variable a controlar, que en este caso es la velocidad lineal, se decidió trabajar temporalmente con radianes/s. Para la conversión de radianes a velocidad lineal, se aplicó una fórmula específica. En la elección del sensor, se dieron prioridad a varios criterios, como alta frecuencia de pulsos, buena resolución en pulsos por revolución (PPR), facilidad de instalación externa en el eje de la banda, durabilidad y confiabilidad a largo plazo, adecuada anchura de la herradura, prescindencia de una fuente externa de alimentación, costo accesible y disponibilidad inmediata.

Se llevó a cabo la construcción de una matriz de despliegue de la función de calidad (QFD) considerando cuatro tipos de sensores (2 ópticos, 1 incremental y 1 magnético), como se muestra en la Tabla 4. Como resultado, se determinó que el sensor óptico FC249 (ilustrado en la Figura 15) cumplía de manera óptima con los requisitos establecidos.

Row #	Max Relationship Value in Row			Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")			
	Relative Weight	Weight / Importance			ENCODER ROTATORIO INCREMENTAL	MOTOR REDUCTOR ENCODER	SENSOR OPTICO HC020K	SENSOR OPTICO F249
1	9	9.4	3.0	Alta frecuencia de lectura de pulsos	○	○	○	○
2	9	12.5	4.0	Buena resolución del encoder - PPR	○	▲	○	○
3	3	15.6	5.0	Facil instalación al eje externo de la banda	▲	▲	○	○
4	9	9.4	3.0	Durabilidad y confiabilidad a largo plazo	○	○	▲	▲
5	9	9.4	3.0	Anchura de herradura	○	○	○	○
6	9	12.5	4.0	No necesita fuente de alimentación externa			○	○
7	9	15.6	5.0	Costo y disponibilidad	▲	○	○	○
8	9	15.6	5.0	No tiene rebotes en la salida digital	○	○	▲	○
Max Relationship Value in Column					9	9	9	9
Weight / Importance					481.3	412.5	475.0	562.5
Relative Weight					24.9	21.4	24.6	29.1

Tabla 4. Matriz QFD para Selección Sensores Encoder.

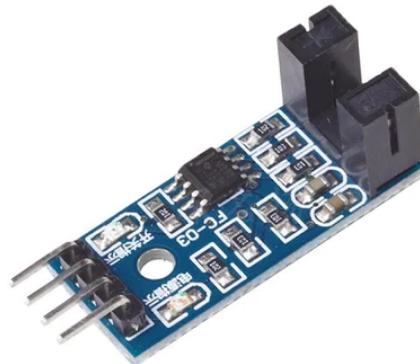


Figura 15. Sensor Óptico F249.

Comparador Opamp: LM393

Voltaje de Operación: 3.3V – 5V DC

Salidas: Analógica y Digital TTL

Tipo de emisor: Fotodiodo IR

Longitud de onda del emisor: 950 nm (infrarrojo)

Tipo de detector: fototransistor

Dimensiones: 32mmx 14mm x 7 mm

Tabla 5. Especificaciones técnicas de Sensor Óptico F249.

Row #	Max Relationship Value in Row			Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")				
	Relative Weight	Weight / Importance			Raspberry pi 4	ESP32	ARDUINO UNO R3	ARDUINO UNO R4 WIFI	ARDUINO MEGA
1	9	22,7	5,0	Soporta 46 interrupciones por segundo	○	○	○	○	○
2	9	18,2	4,0	Tiene Bluetooth Wifi	○	○		○	
3	9	13,6	3,0	Tiempo de implementación bajo	▲	○	○	○	○
4	9	18,2	4,0	Precio y disponibilidad	▲	○	○	▲	○
5	9	18,2	4,0	Visualización de datos en tiempo real en Arduino Cloud		○	○	○	○
6	9	9,1	2,0	Visualización de datos en tiempo real en Johnny-Five	○	○	○	○	○
Max Relationship Value in Column					9	9	9	9	9
Weight / Importance					481,8	572,7	600,0	645,5	490,9
Relative Weight					17,3	20,5	21,5	23,1	17,6

Tabla 6. Matriz QFD para Selección Sistema Embebido.



Figura 16. Arduino UNO R3.

**Microcontrolador:** ATmega328  
**Voltaje Operativo:** 5v  
**Voltaje de Entrada (Recomendado):** 7 - 12 v  
**Pines de Entradas/Salidas Digital:** 14 (De las cuales 6 son salidas PWM)  
**Pines de Entradas Análogas:** 6  
**Memoria Flash:** 32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB es usado por Bootloader.  
**SRAM:** 2 KB (ATmega328)  
**EEPROM:** 1 KB (ATmega328)  
**Velocidad del Reloj:** 16 MHZ.

Tabla 7. Especificaciones técnicas de sistema embebido.

#### Diseño del sistema electrónico

En este campo se debe realizar la descripción, cálculos matemáticos y planos de los diferentes circuitos eléctricos que utilizó para el desarrollo del proyecto, además del diagrama de conexión de los elementos al sistema embebido

Se han enfrentado dificultades al intentar leer los pulsos digitales generados por el comparador LM-393 en este encoder. Este problema no pudo anticiparse en la matriz QFD, ya que surgió de manera experimental. Tanto Arduino UNO como MEGA registran más pulsos de los que realmente se generan, mostrando una lectura aproximadamente cuatro veces mayor de lo esperado.

Después de realizar una investigación en línea, se descubrió que este sensor es altamente sensible a interferencias que pueden ocurrir en los pines VCC y GND. Al alimentar el sensor directamente desde el Arduino a 3.3V o 5V, es posible que el regulador de tensión del Arduino introduzca corrientes parásitas en el sensor, lo que puede conducir a un mal funcionamiento.

Para una investigación más detallada, se utilizó un osciloscopio conectado entre los pines D0 y GND para analizar los pulsos generados por el encoder:

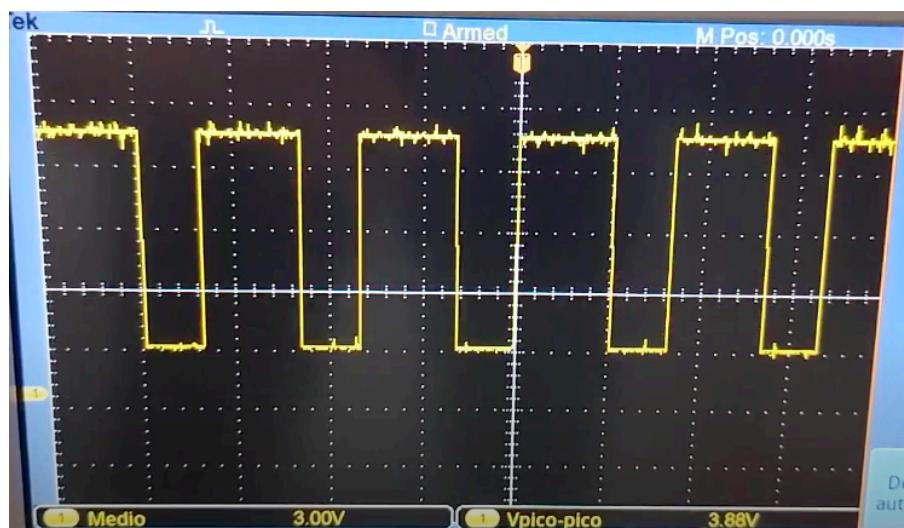


Figura 17. Señal del pulso en D0.

En la Figura 17, se observa que el pulso generado parece ser cuadrado y correcto a simple vista. Sin embargo, una inspección detenida revela que cuando la señal se mantiene en estado alto, surgen pequeñas oscilaciones que pueden ocasionar errores. Arduino, al ser altamente sensible, interpreta estos rebotes como pulsos válidos, cuando en realidad no lo son. Tras llevar a cabo pruebas exhaustivas, se determinó que la mejor manera de mitigar estos rebotes era colocar un condensador en paralelo entre los pines D0 y GND. Este ajuste condujo a:

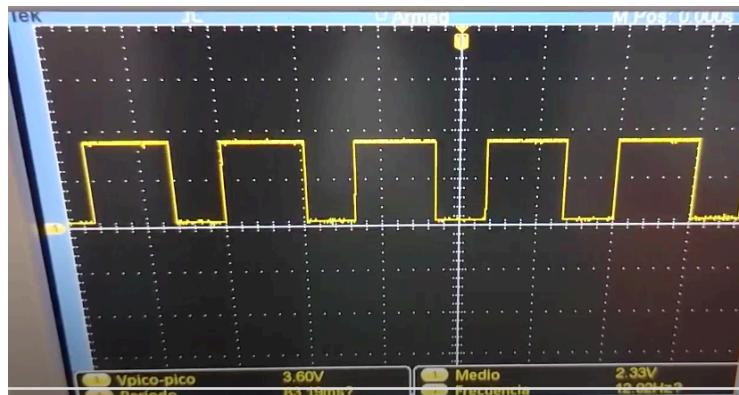


Figura 18. Señal del Punto en D0 con Filtro.

Para disipar cualquier inquietud sobre si este condensador introduce algún retraso en la señal digital y afecta la lectura posterior de los radianes/s, realizamos pruebas tanto antes como después del filtro. Los resultados demuestran que este acondicionamiento no ocasiona ningún retraso en la lectura de la velocidad angular, como se ilustra en la Figura 19:

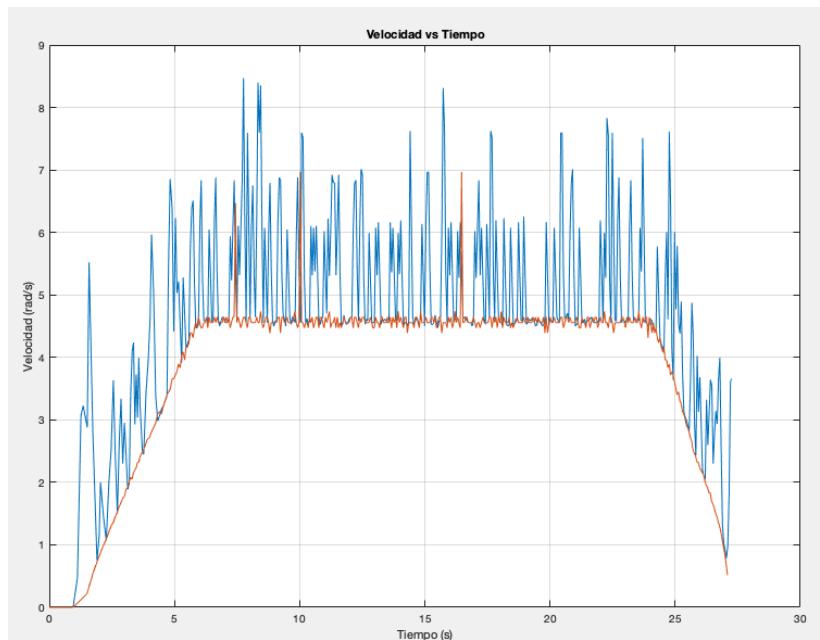


Figura 19. Velocidad Angular de la Banda a 100% PWM. Azul(SIN FILTRO). Naranja(CON FILTRO ANÁLOGO).

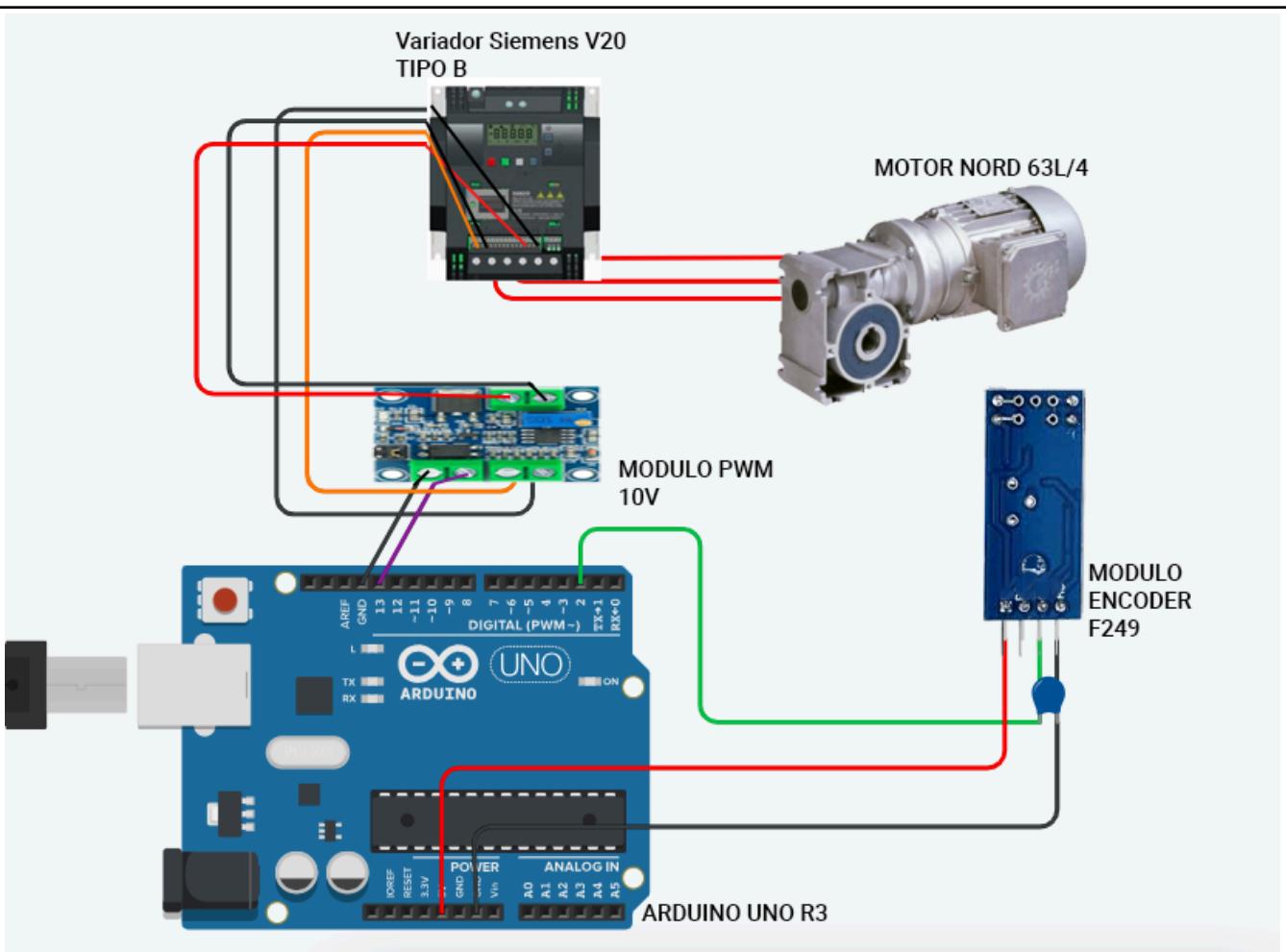


Figura 20. Circuito Esquemático Eléctrico.

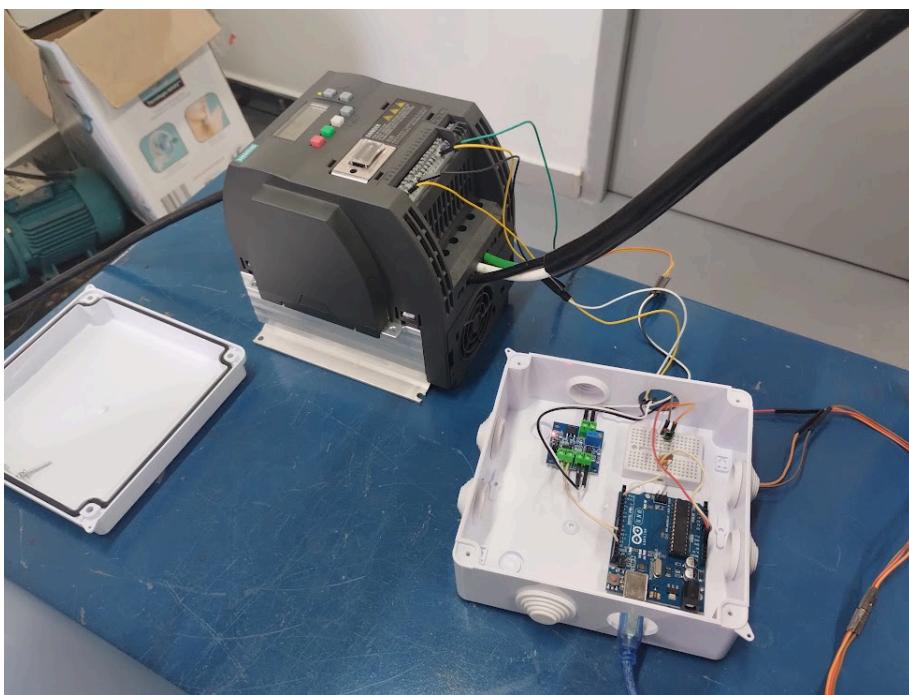


Figura 21. Montaje eléctrico físico.

### Modelo Dinámico

En este campo se debe indicar las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento dinámico del sistema, además los parámetros y resultados de la simulación en Matlab del modelo matemático a lazo abierto

Las ecuaciones eléctricas y mecánicas que describen el voltaje balanceado en estado estable en todos los marcos de referencia de rotación asíncrona se expresan en coordenadas d-q para el estator y el rotor del motor.

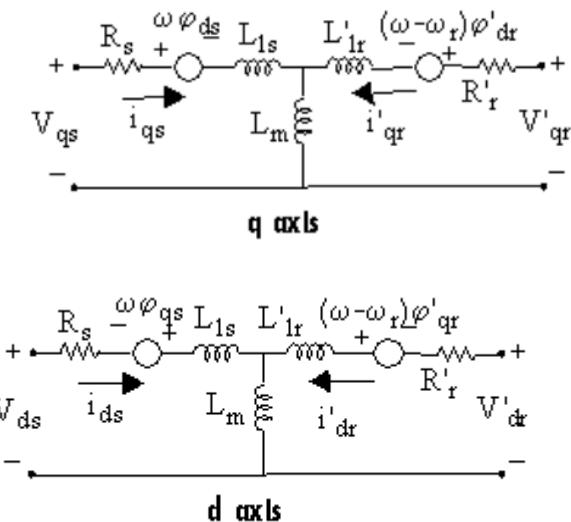


Figura 22. Circuito Equivalente en Coordenadas d-q Jaula de Ardilla Simple.

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega \varphi_{ds}$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega \varphi_{qs}$$

$$V'_qr = R'_r i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr}$$

$$V'_dr = R'_r i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}$$

$$T_e = 1.5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - b\omega_m - T_m)$$

Ecuaciones 1. Ecuaciones Jaula de Ardilla Simple eje dq.

Dónde  $R_s$  y  $R'_r$  corresponden a la resistencia del estator y rotor respectivamente,  $\varphi(d-q)s$  y  $\varphi(d-q)r$  corresponde al flujo magnético del estator y rotor respectivamente,  $f$  es la frecuencia del sistema y  $\omega_r$  es la velocidad angular eléctrica,  $L_s$  y  $L'_r$  corresponde a la inductancia del estator y rotor respectivamente.  $\omega_m$  es la velocidad angular mecánica del rotor,  $H$  es la constante de inercia combinada del rotor, y  $b$  es el coeficiente combinado del rotor y la viscosidad de la carga.

Se requiere una relación adicional, expresada como la Ecuación 2, dado el interés en la velocidad mecánica en lugar de la eléctrica. Esta conexión se integra en las Ecuaciones 1.

$$\omega_{elect} = (P/2)\omega_{mech}$$

Ecuación 2. Relación velocidad eléctrica y mecánica.

Con el objetivo de simplificar los despejes y facilitar el trabajo en MATLAB, se decide representar las ecuaciones dinámicas en forma matricial. El procedimiento para la transformación a matrices se detalla en el Anexo 1.

Finalmente, se derivan las siguientes ecuaciones diferenciales en forma matricial. Con la asistencia del bloque de MATLAB Function, se obtiene la función mecánica que sigue el sistema presente y es utilizada posteriormente para las simulaciones.

$$\begin{aligned} dI &= -(\text{inv}(L)*R + \text{inv}(L)*\omega_a*L)*I + \text{inv}(L)*V; \\ Te &= 1.5*p*Lm*(I_{qs}*I_{dr} - I_{ds}*I_{qr}); \\ dwm &= (1/J)*(Te - (b)*w_m); \end{aligned}$$

Ecuaciones 3. Ecuaciones matriciales para obtener la respuesta transitoria mecánica del sistema.

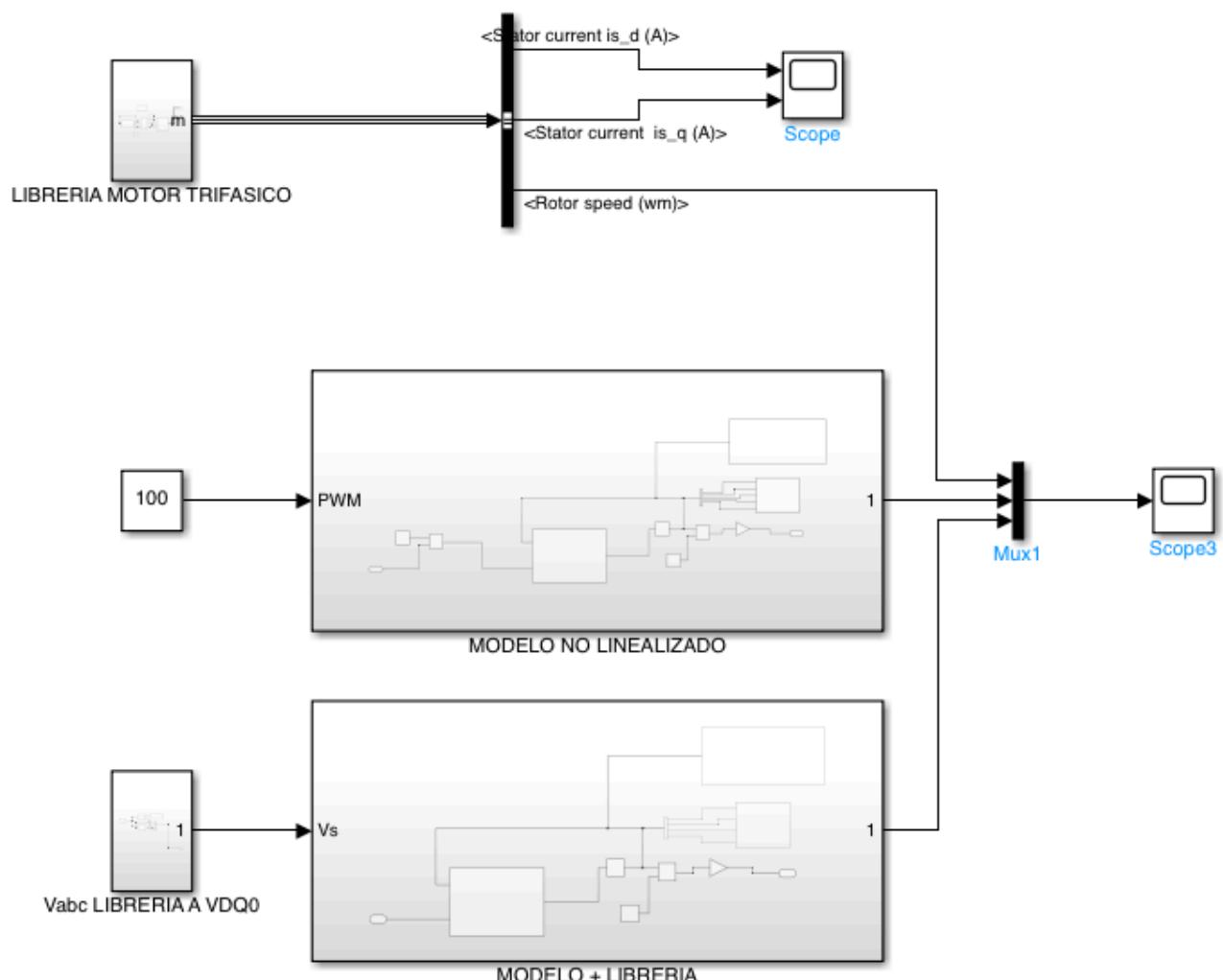


Figura 23. Bloques para verificación modelo matemático en MATLAB.

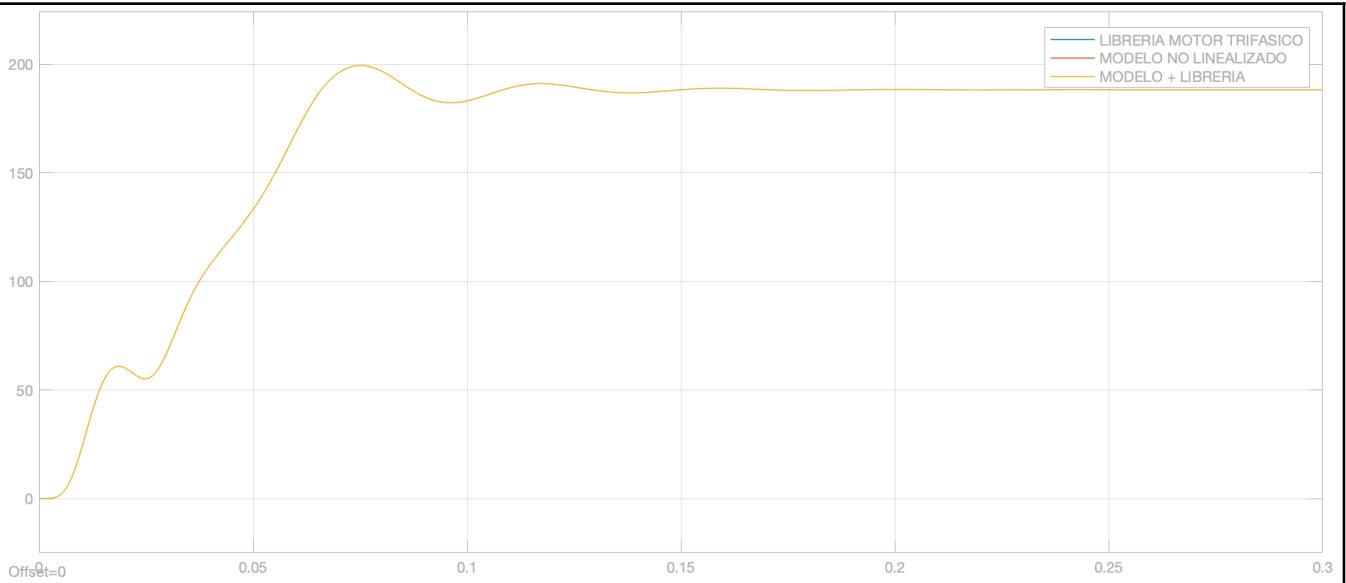


Figura 24. Respuesta transitoria modelo matemático en MATLAB.

Eje X: Tiempo (segundos)

Eje Y: Velocidad (rads/s)

Dado que el motor del laboratorio de automatización se encuentra físicamente conectado a una caja reductora, es imperativo incorporar esta relación en el modelo matemático antes de proceder con la linealización. La caja reductora presenta una relación de engranajes en la reducción de velocidad de 1/40. Esta proporción se integra en la ecuación de la velocidad mecánica como una constante. Al realizar este ajuste, las nuevas ecuaciones dinámicas matriciales son las siguientes:

```
dI = -(inv(L)*R + inv(L)*omega*L)*I + inv(L)*V;
Te = 1.5*p*Lm*(Iqs*Idr - Ids*Iqr);
dwm = (1/J)*Kcj*(Te - (b)*wm);
```

Ecuaciones 4. Ecuaciones matriciales con relación de caja reductora.

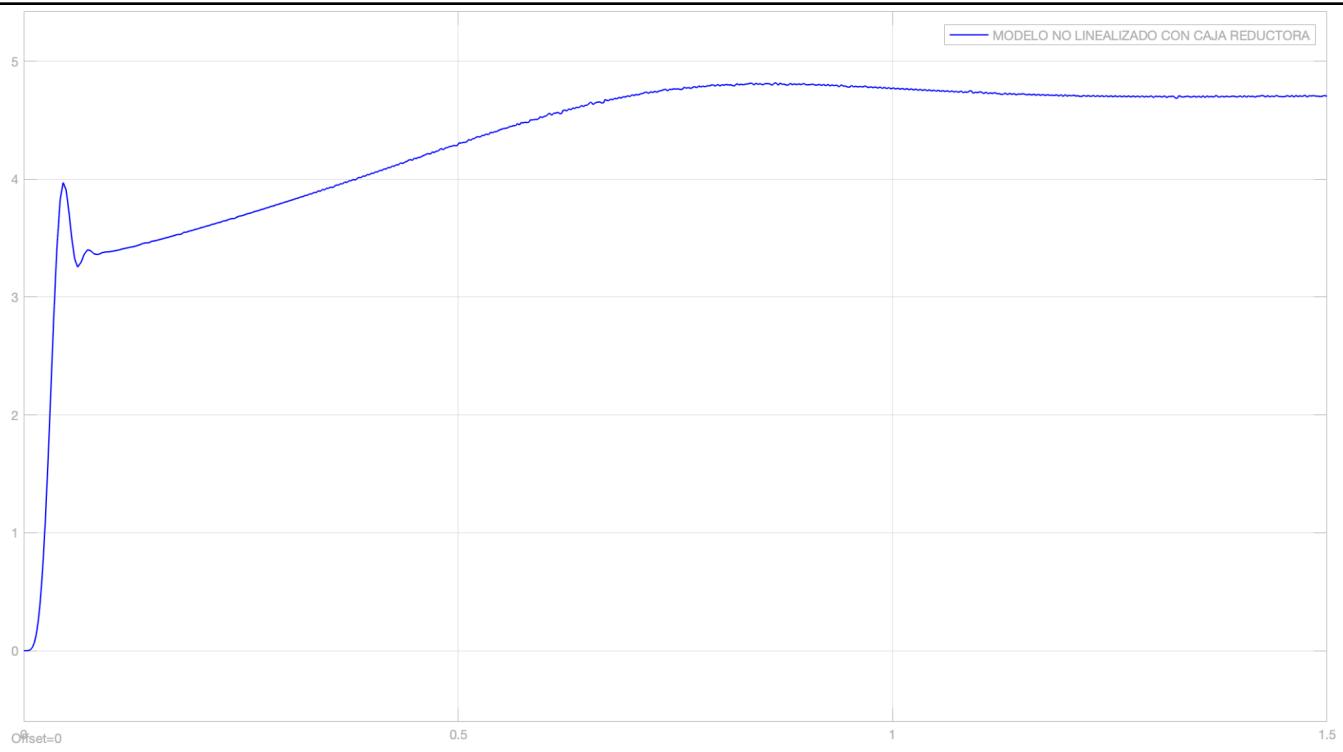


Figura 25. Respuesta transitoria modelo matemático en MATLAB con caja reductora.

Eje X: Tiempo (segundos)

Eje Y: Velocidad (rads/s)

Considerando el modelo matemático correctamente definido para la caja reductora, se procede a efectuar el ajuste de parámetros utilizando los datos previamente registrados en lazo abierto de la banda transportadora. Posteriormente, se lleva a cabo la linealización del sistema, describiendo cada paso detalladamente en el Anexo 2. La función de transferencia resultante, junto con su correspondiente respuesta transitoria ante una entrada tipo escalón, se presenta a continuación.

```
%DATOS MOTOR LIBRERIA
Lr = 0.005974;%1
Lm = 0.2037;%2
Ls = 0.005974;%3
Rr = 1.083;%4
Rs = 1.115;%5
p = 2;%6
J = 0.02;%7
b = 0.005752;%8
f = 60;%9
Vs = 220;%10
Kcj = 1/40%11
```

Parameter values:

```
J = 0.000708465775705982
Lm = 0.0599744390617798
Lr = 0.00664479606290913
Ls = 0.0040289456409115
Rr = 2.23921019090864
Rs = 0.453582712429716
b = 0.00556087584125463
```

Tabla 8. Parámetros iniciales y parámetros finales.

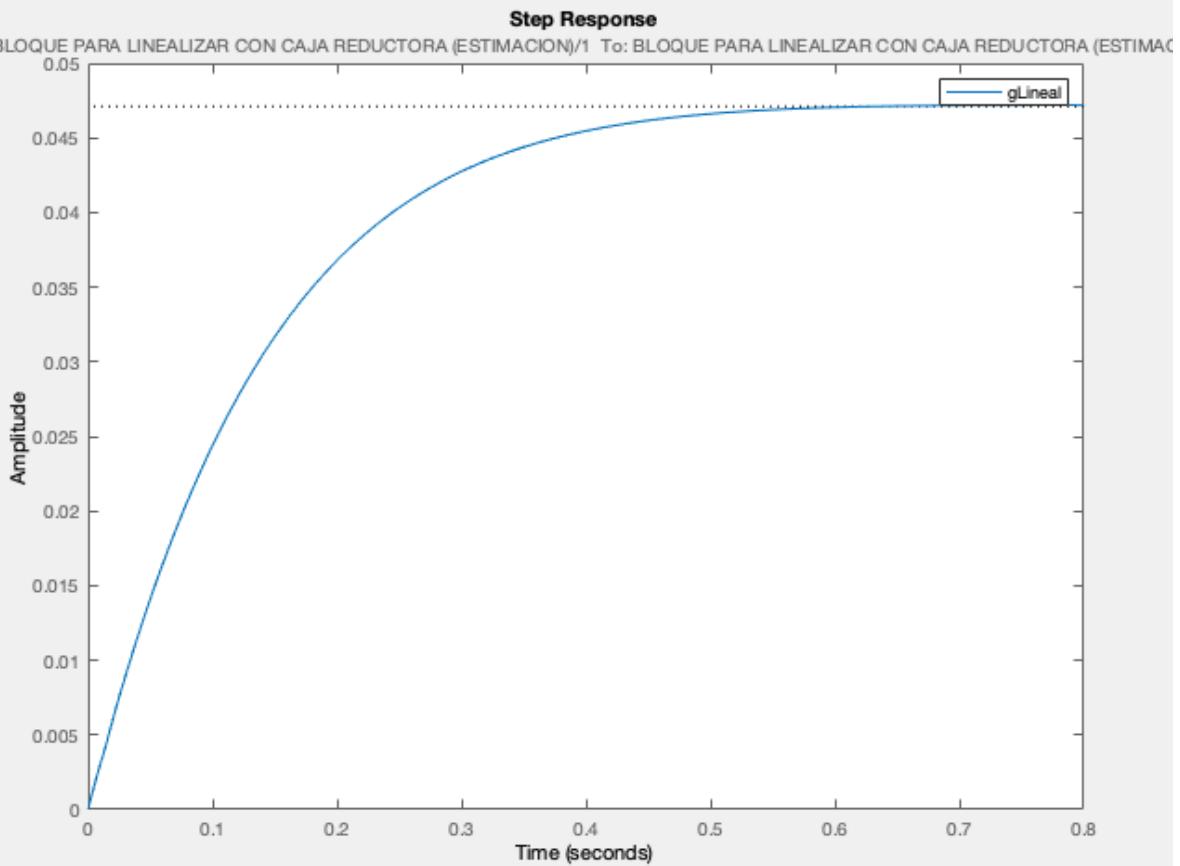


Figura 26. Respuesta transitoria sistema linealizado.

$$G = \frac{1.279e-07 s^3 + 129300 s^2 + 1.881e07 s + 2.186e08}{s^5 + 520.6 s^4 + 458000 s^3 + 1.043e08 s^2 + 1.308e09 s + 4.64e09}$$

Continuous-time transfer function.

Ecuación 6. Función de transferencia linealizada del sistema en continua.

Antes de abordar los diseños de los controladores, resulta necesario realizar la discretización de la función. Este paso se lleva a cabo con el objetivo de prevenir posibles inconvenientes relacionados con el periodo de muestreo en el futuro. En relación a lo mencionado, la función de transferencia G, una vez discretizada, queda de la siguiente manera:

$$Gz = \frac{0.007361 z^4 - 0.004986 z^3 + 0.0003558 z^2 - 4.635e-06 z + 1.487e-08}{z^5 - 1.543 z^4 + 0.6066 z^3 - 0.00544 z^2 + 2.381e-05 z - 9.042e-10}$$

Sample time: 0.04 seconds

Ecuación 7. Función de transferencia linealizada del sistema discreta.

Considerando que el objetivo es alcanzar un tiempo de establecimiento de 1 segundo y se planea realizar 20 muestras, se obtiene un periodo de muestreo de 50 ms, sin embargo, se decide optar por un periodo de 40 ms.

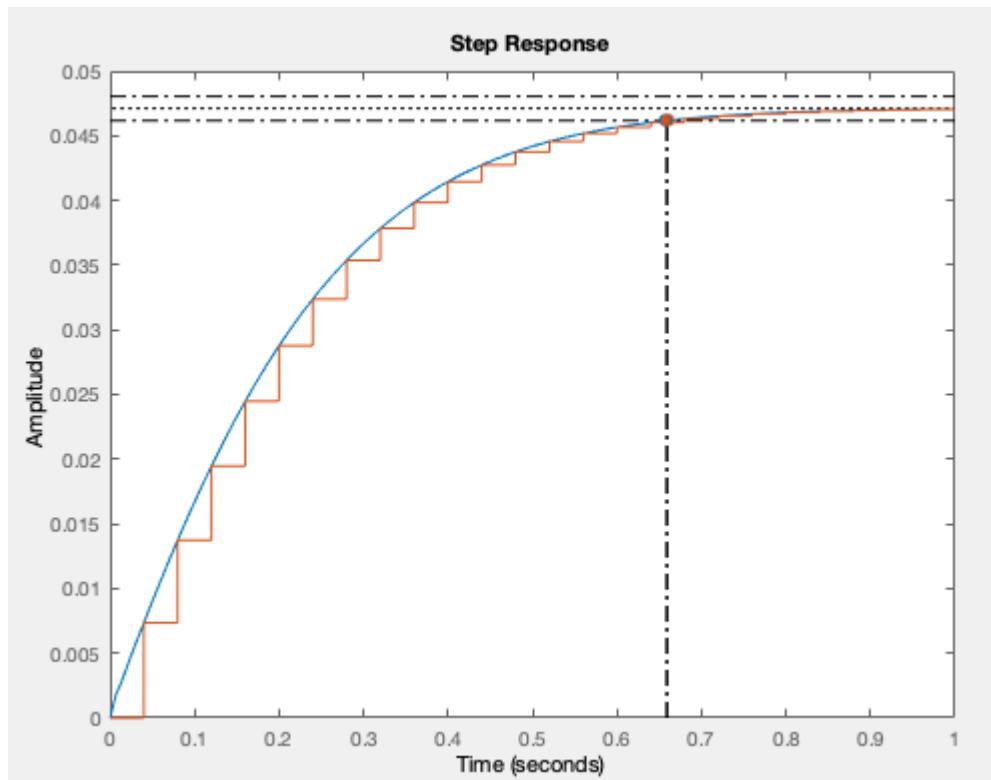


Figura 26. Respuesta transitoria continua y discreta.

Se contrastan las funciones teóricas con los datos experimentales en presencia de un PWM del 25%, dando como resultado lo siguiente:

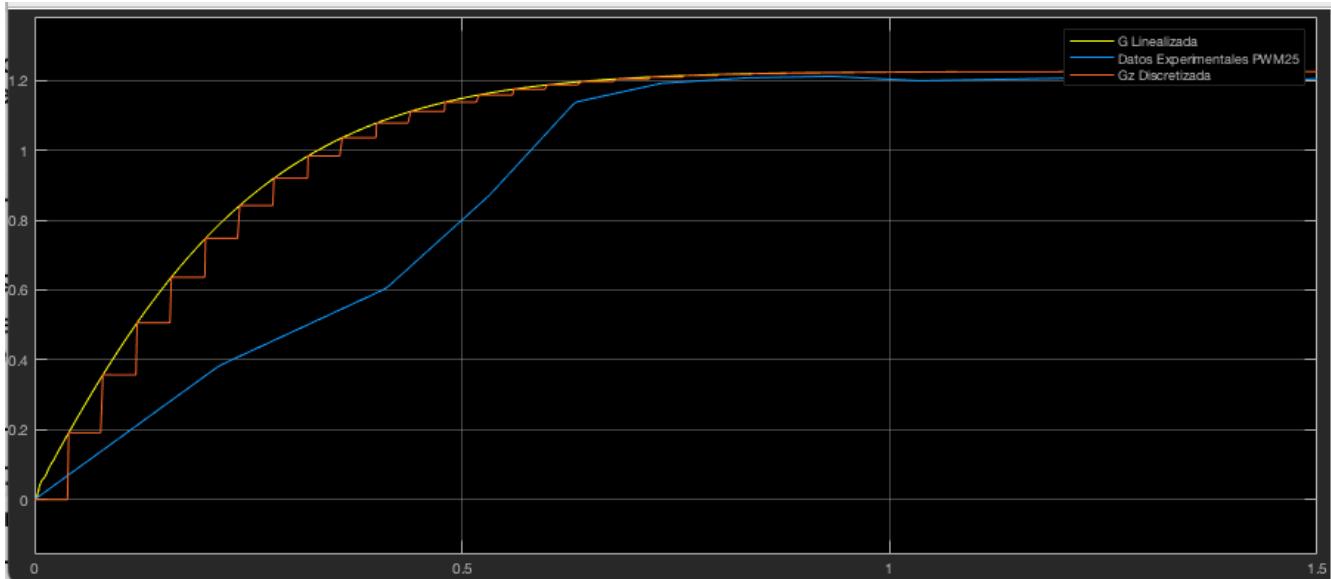


Figura 27. Respuesta transitoria continua, discreta y experimental a lazo abierto con 25% de PWM.

Eje X: Tiempo (segundos)

Eje Y: Velocidad (rads/s)

Así se valida el modelo matemático propuesto, ya que logra alcanzar el mismo valor en estado estable y el mismo tiempo de establecimiento. Es importante señalar que el tiempo de levantamiento no se cumple debido a la implementación de una rampa de aceleración por parte del variador de frecuencia, aspecto que se espera minimizar mediante la estrategia de control.

#### Diseño de la estrategia de control.

Se debe documentar el diseño del controlador, PID digital, de uno o dos grados de libertad, además presentar los resultados de la simulación en lazo cerrado dado el modelo dinámico del sistema.

Antes de concebir la estrategia de control, es imperativo establecer los criterios de operación de la banda transportadora. Como se indicó previamente, la intención es transportar botellas de 30 cm de altura. Por lo tanto, se requiere especial atención a la aceleración inicial al pasar de reposo a movimiento. De manera similar, el sistema debe reaccionar con prontitud cuando se solicite una velocidad específica. Los criterios establecidos son los siguientes:

1. Implementar acciones de control suaves.
2. Lograr tiempos de establecimiento en torno a 1 segundo.
3. Obtener respuestas transitorias que exhiban comportamientos sobreamortiguados.

En línea con estos criterios, la opción inicial consiste en diseñar un controlador de un grado de libertad PID ideal:

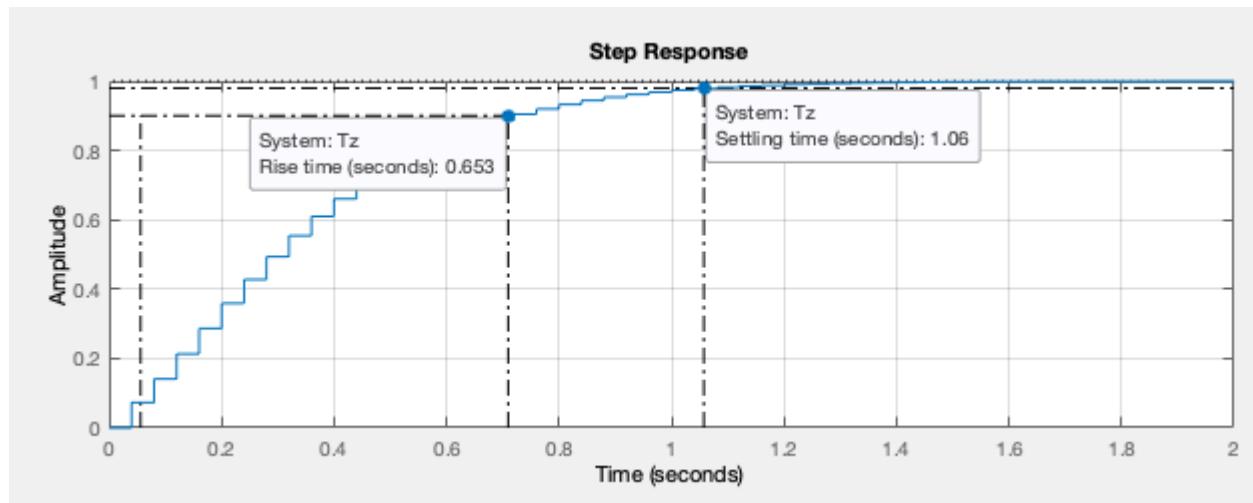


Fig 28. Respuesta transitoria Wout PID.

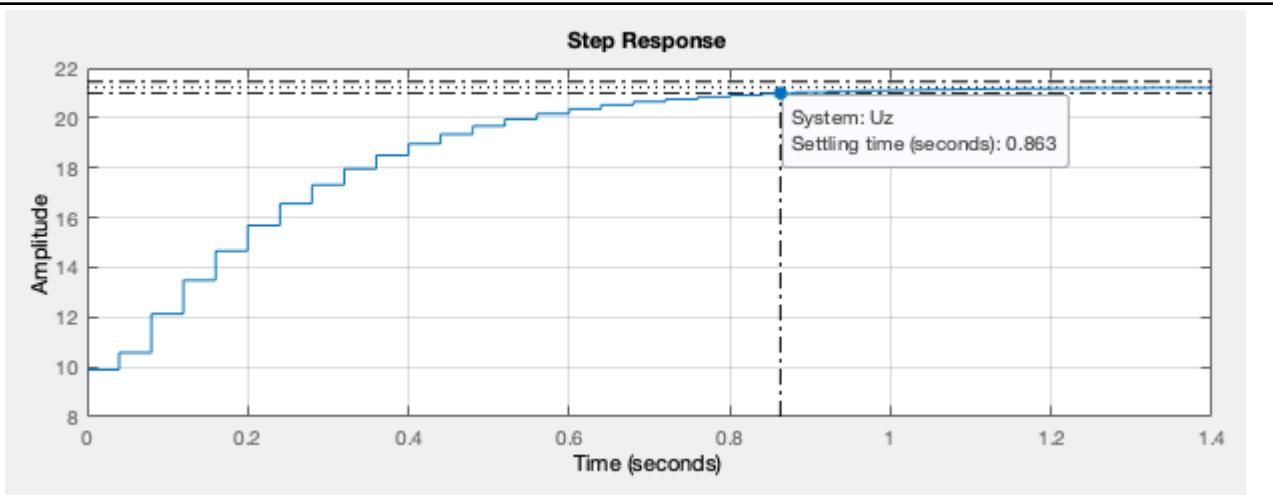


Fig 29. Respuesta transitoria acción de control PID.

**Cpid =**

$$\frac{9.89 z^2 - 8.485 z + 0.9276}{z^2 - z}$$

**Sample time: 0.04 seconds**

Ecuación 8. Función de transferencia controlador PID ideal 1 DOF.

Se ha logrado diseñar un controlador PID óptimo que alcanzará el punto de referencia establecido y cumplirá con los criterios de diseño establecidos.

Una vez completado el diseño, se tomó la decisión de llevar a cabo simulaciones en lazo cerrado con distintos puntos de referencia.

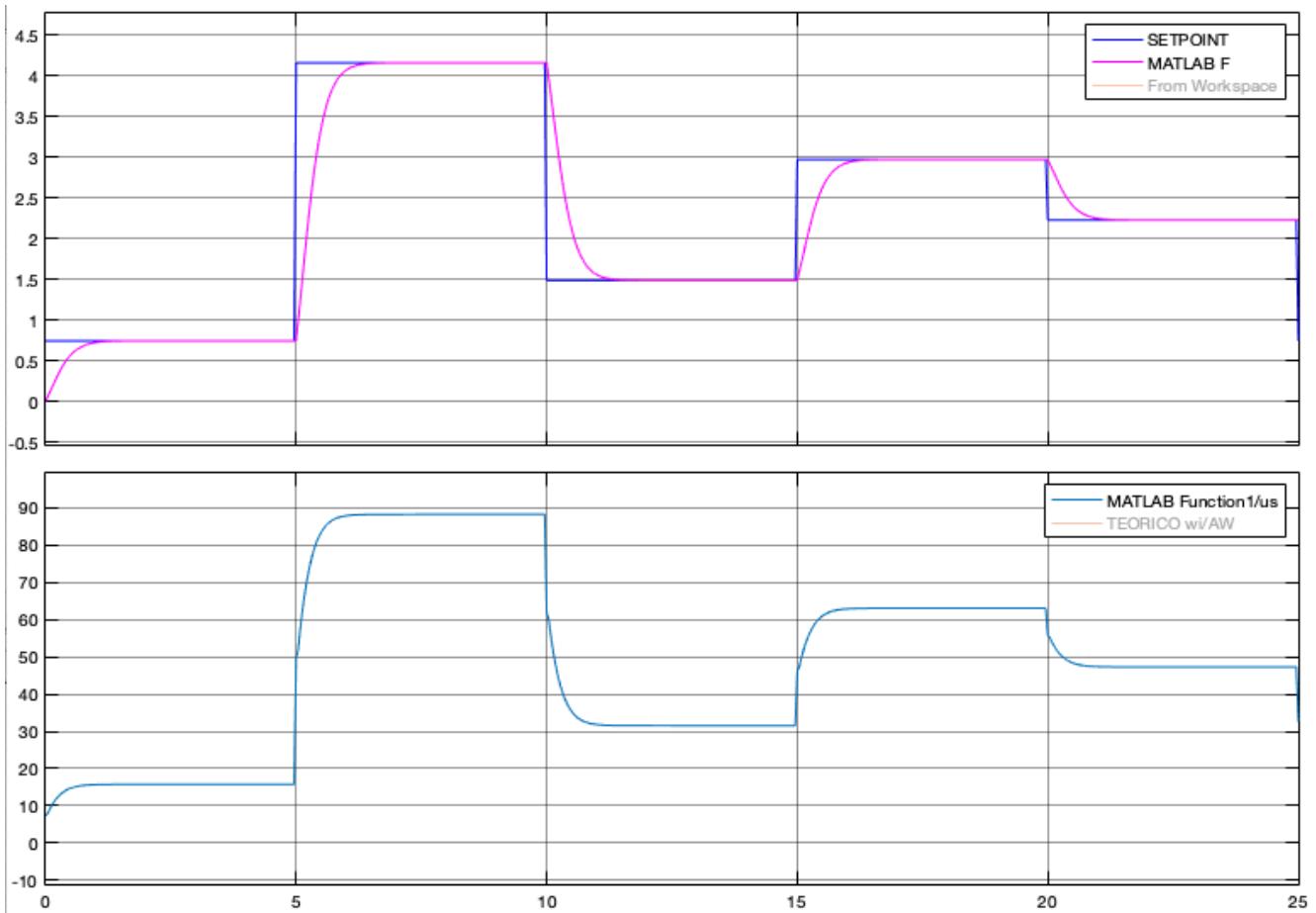


Figura 30. Respuesta transitoria a lazo cerrado con distintos puntos de referencia controlador PID.

Eje X: Tiempo (segundos)  
Eje Y: Velocidad (rads/s)

Los resultados evidencian que el controlador de un grado de libertad PID se ajusta eficientemente a las variables de consigna en un sistema de lazo cerrado.

Se opta por desarrollar dos controladores adicionales en este escenario, cada uno con 2 grados de libertad: PI-D y PI-PD, respectivamente. Esto se realiza con el objetivo de evaluar alternativas y seleccionar la opción más efectiva entre las tres. Los procedimientos de diseño para estos dos controladores se encuentran detallados en el Anexo 3. A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones correspondientes:

PI-D:

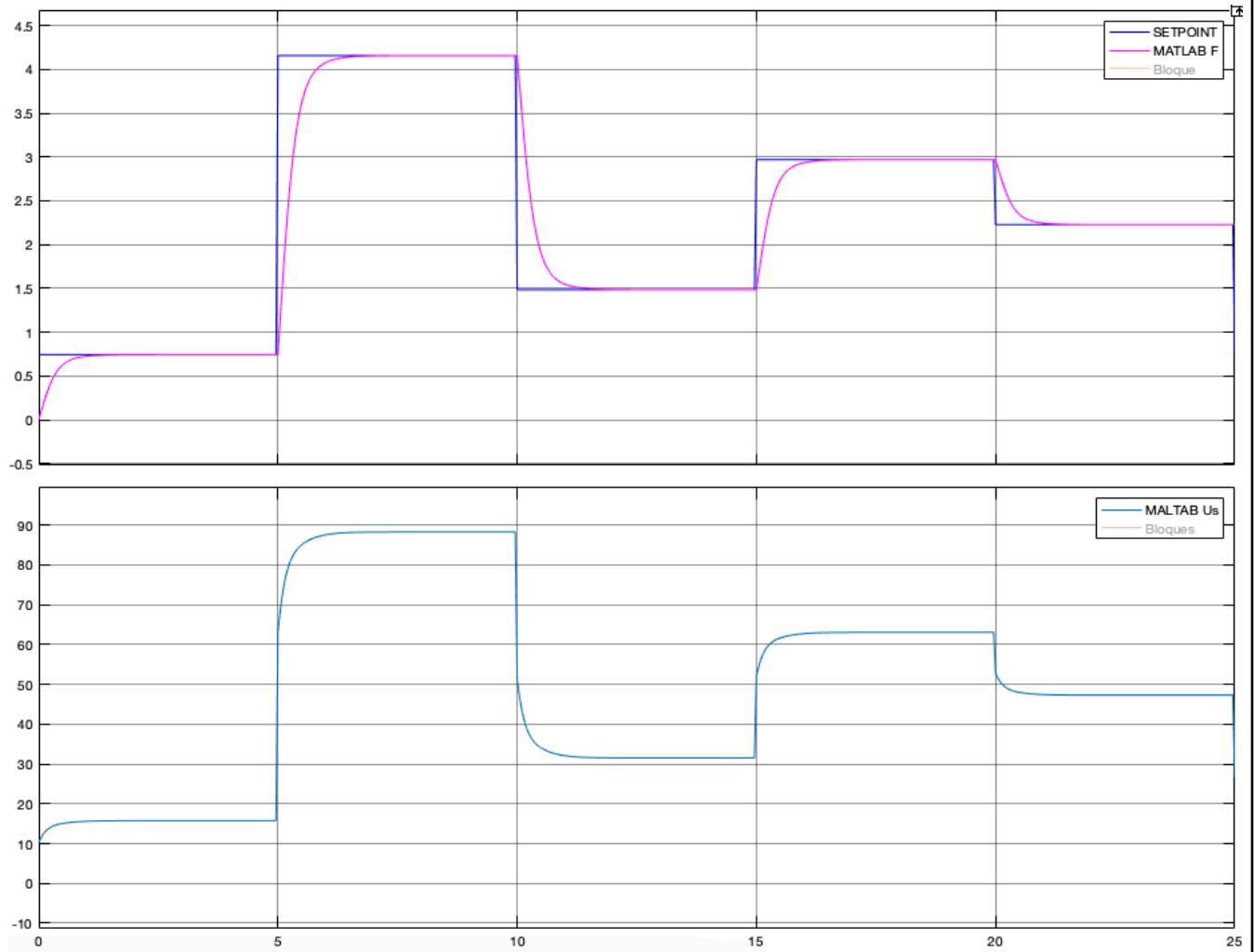


Figura 31. Respuesta transitoria a lazo cerrado con distintos puntos de referencia controlador PI-D.

Eje X: Tiempo (segundos)

Eje Y: Velocidad (rads/s)

PI-PD:

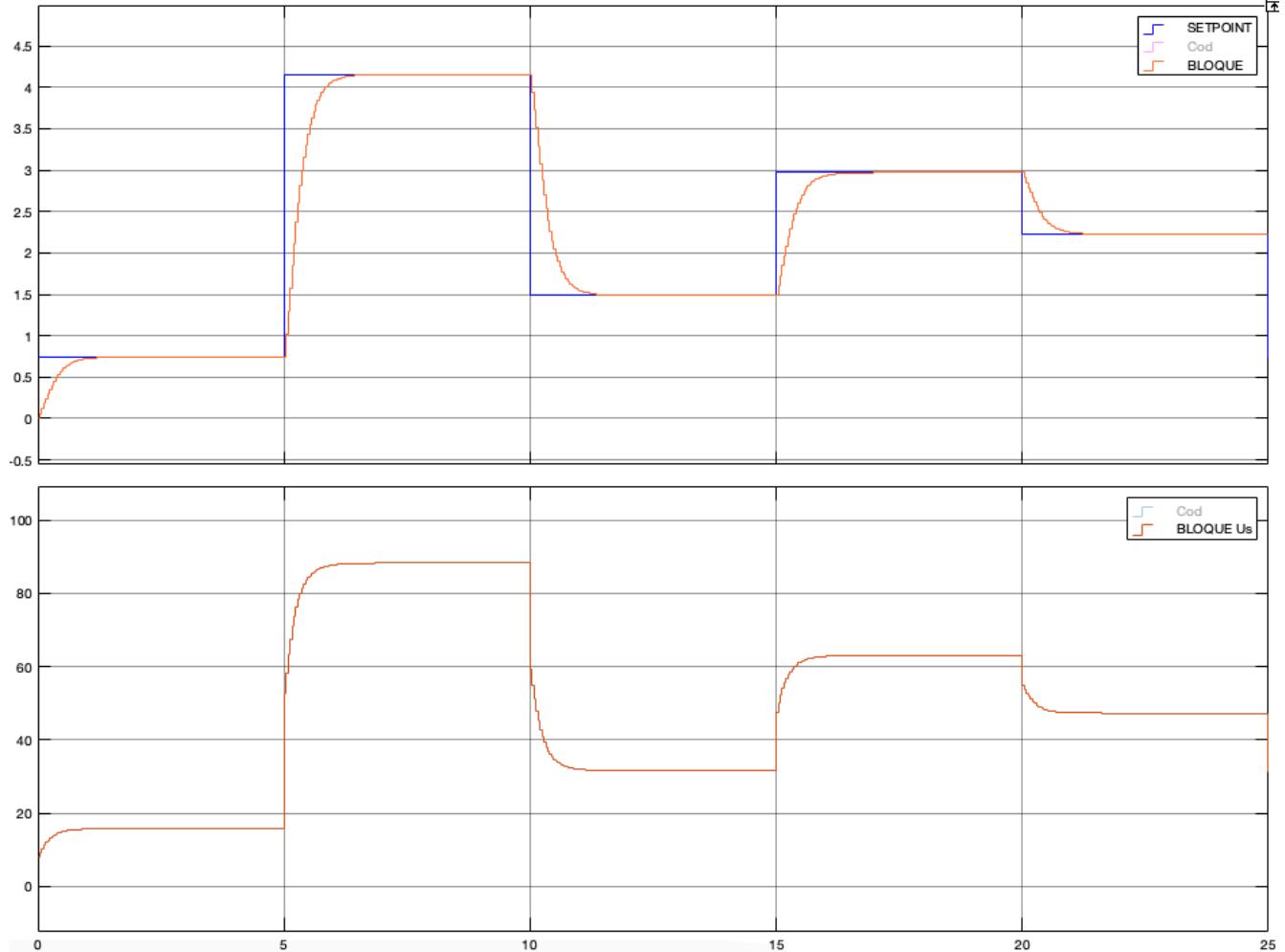


Figura 32. Respuesta transitoria a lazo cerrado con distintos puntos de referencia controlador PI-PD.

Eje X: Tiempo (segundos)

Eje Y: Velocidad (rads/s)

Se observa que la simulación de los tres controladores cumple con los criterios de diseño presentados inicialmente. En este caso, se opta por implementar los tres controladores para analizar sus respuestas en un entorno real, permitiendo así una observación adecuada de posibles diferencias.

## Plataforma IoT

Antes de conceptualizar la plataforma IoT, resulta imperativo establecer sus criterios de diseño, considerando el área de aplicación y las limitaciones técnicas. Los criterios son los siguientes:

1. Gestión eficiente de interrupciones.
2. Conexiones simultáneas sin depender de aplicaciones de terceros.
3. Visualización en tiempo real de datos.
4. Control de velocidad y selección flexible del tipo de controlador.
5. Escalabilidad sencilla de funciones.
6. Implementación de tareas I/O (entrada/salida) eficientes y no bloqueantes.

Considerando estos criterios, se ha diseñado una plataforma web en un servidor local para supervisar y controlar la velocidad de una banda transportadora (medida en cm/s, según el contexto del proyecto), gestionar el tipo de controlador y visualizar respuestas transitorias en tiempo real.

Dado que la plataforma web reside en un servidor local, se vuelve accesible para cualquier dispositivo conectado a la misma red a través de un navegador web, permitiendo a los usuarios acceder sin necesidad de una aplicación adicional.

Para lograr la compatibilidad con Arduino, es esencial instalar el framework Johnny-Five en el sistema embebido, basado en JavaScript. Dado que se están conectando hardware y los eventos en Arduino se interpretan como pines, se requiere el uso de Node.js en el lado del servidor, centrado en eventos asíncronos.

Una vez que Arduino está conectado y ejecuta código desde el lado del servidor, se utiliza Express.js, una librería npm, para enviar y recibir datos estáticos servidor-cliente. Además, Sockets.io facilita la transmisión de datos en tiempo real desde el servidor al cliente.

En resumen, la plataforma web consta de dos partes principales: el lado del cliente y el lado del servidor.

Lado del servidor: Arduino está conectado y ejecuta su función principal de controlar la banda transportadora mediante el sensor óptico y la salida de PWM. La naturaleza de Node.js permite gestionar todo como eventos no bloqueantes, evitando pérdidas de tiempo en la ejecución del código.

Lado del cliente: La interfaz visual de la plataforma web se conecta con los datos calculados por Arduino mediante Express y Sockets.io. El cliente envía datos, como la velocidad deseada y el tipo de controlador, y recibe en tiempo real los datos calculados desde el servidor, que se representan gráficamente.

Aunque el lado del servidor y el lado del cliente están interconectados, operan de forma independiente para garantizar la asincronía del sistema y mantener tiempos de ejecución bajos. La gestión de eventos bloqueantes en Node.js permite llevar a cabo múltiples tareas, como contar pulsos en un pin digital, enviar PWM y gestionar la transmisión bidireccional de datos en tiempo real.



Figura 33. Representación IOT.

PANEL DE CONTROL BANDA TRANSPORTADORA

UNAB

Bloquear

Documentación

Ayuda

Acciones

SetPoint:

Tipo de Control

PID

ACTUALIZAR PARAR CONFIGURAR MANUAL PID

GRAFICA VELOCIDAD

Velocidad Filtrada SP

32 30

GRAFICA PWM

PWM

100 90 80 70 60 50 40 30 20

Información

Velocidad (cm/s):

SetPoint:

% PWM:

LIMPIAR DATOS

Información

Velocidad (rads/s):

SetPoint:

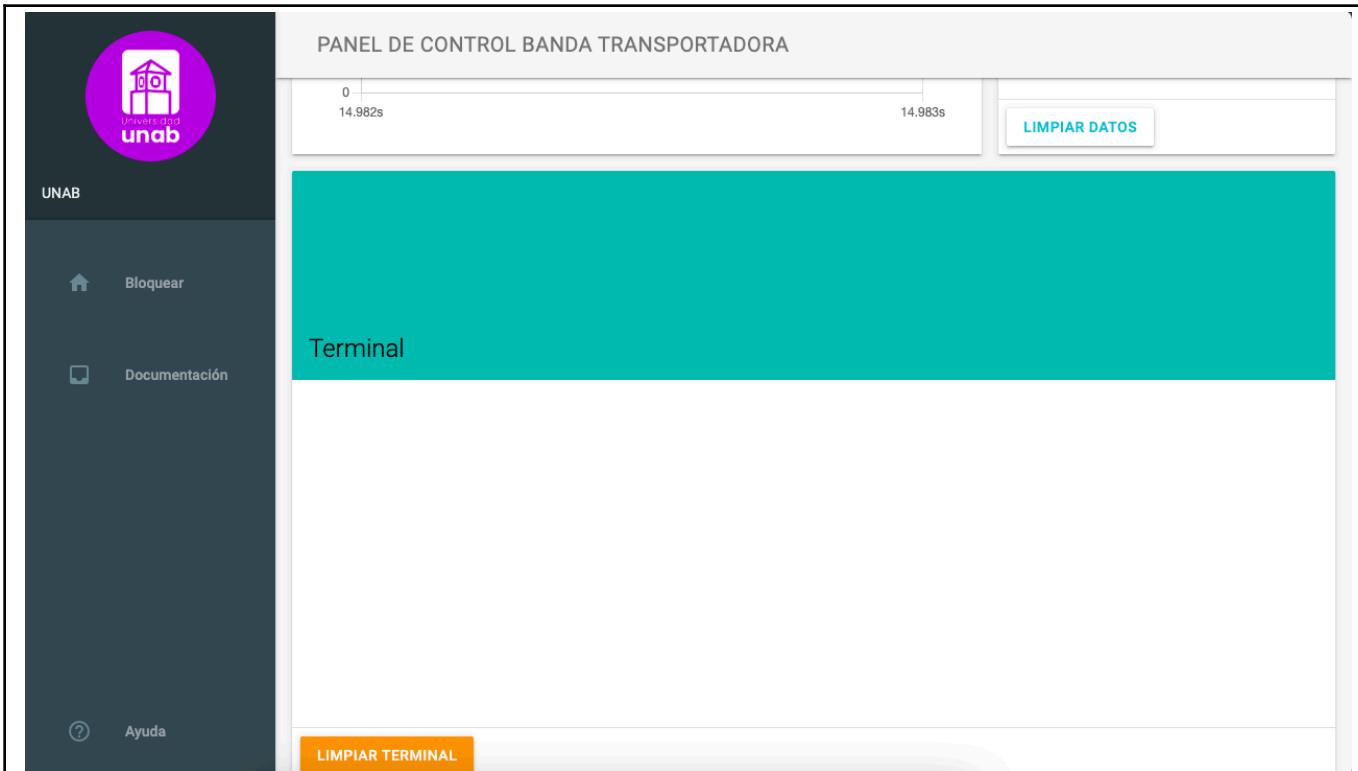
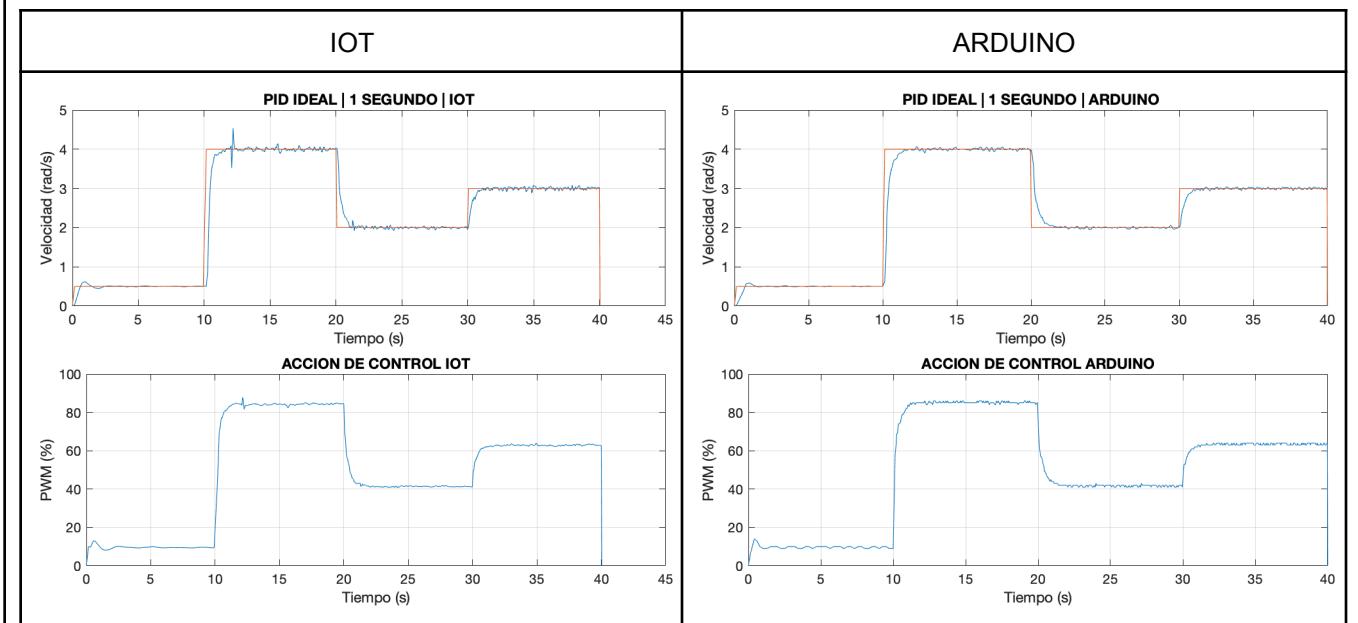


Figura 34. Plataforma web IoT.

Ante la necesidad de validar la precisión de los datos adquiridos mediante la plataforma IoT y confirmar su correcto funcionamiento, se lleva a cabo una comparación con Arduino nativo. En este proceso, se envían diversos setpoints y se analizan las respuestas transitorias correspondientes.



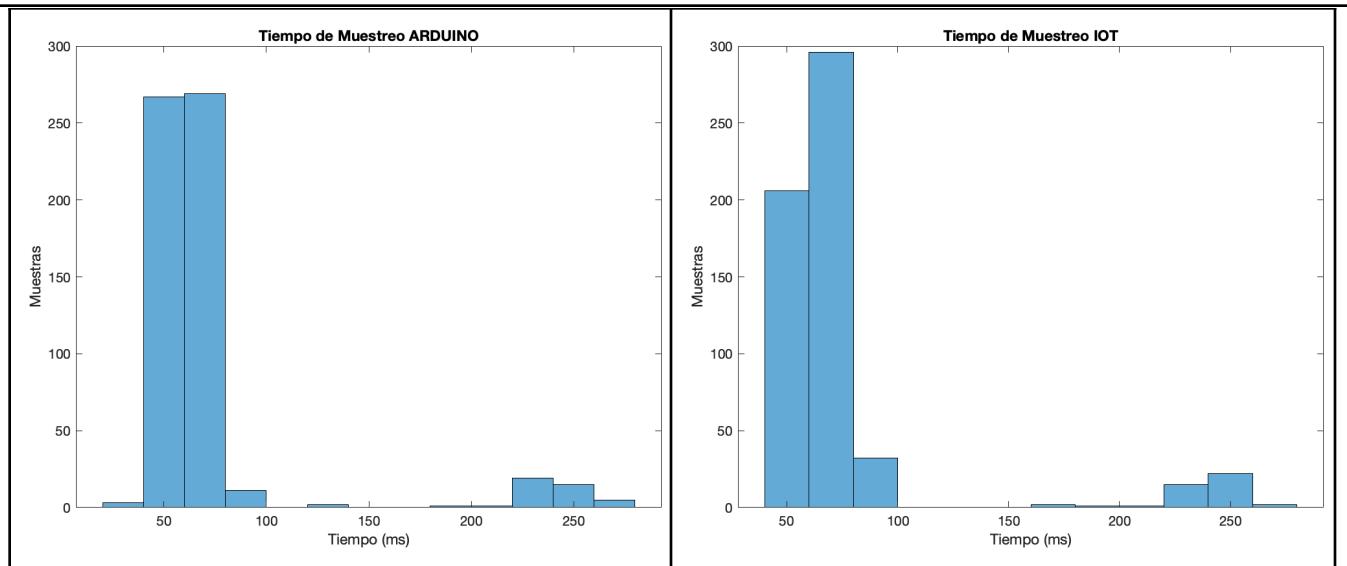


Tabla 9. Respuesta transitoria Ys y Us para Arduino y IOT.

A partir de lo expuesto, se deduce que la plataforma IoT cumple con el periodo de muestreo, incluso con las múltiples funciones implementadas en ella. Sin embargo, a diferencia de Arduino, la IoT carece de bibliotecas para filtros de media móvil. Por consiguiente, fue necesario programar un filtro de este tipo. No obstante, según las gráficas, se observa que el filtro de Arduino es más eficiente, ya que se percibe ruido en la señal de la IoT. Para verificar la aceptabilidad de este ruido, se realiza un acercamiento a la zona más crítica. Se constata que la señal se mantiene dentro del rango del 2% al 5% del valor en estado estable.

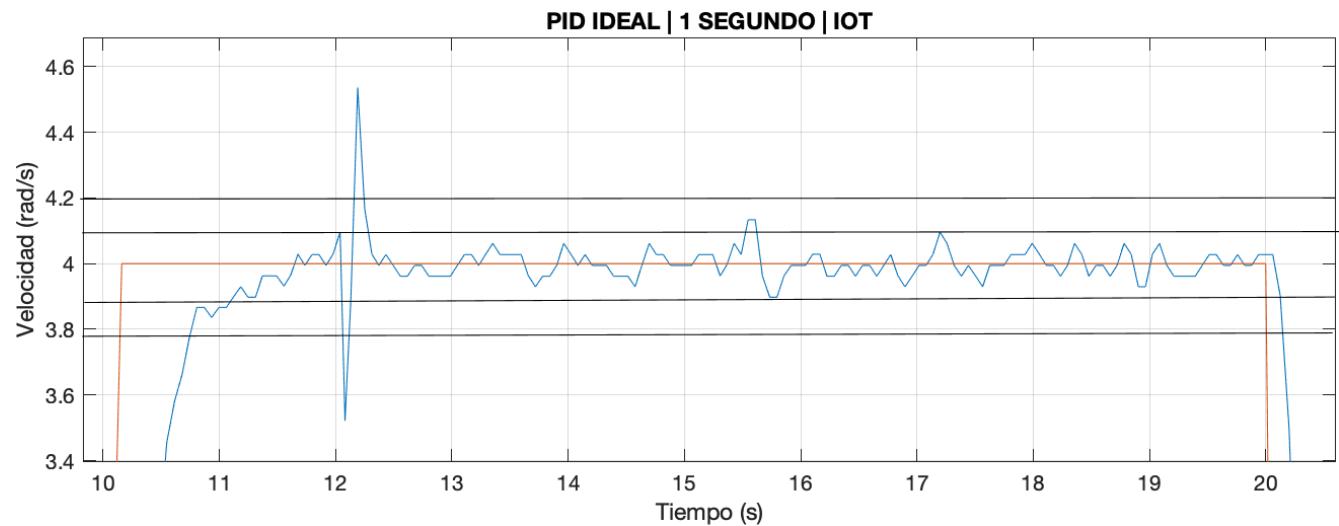
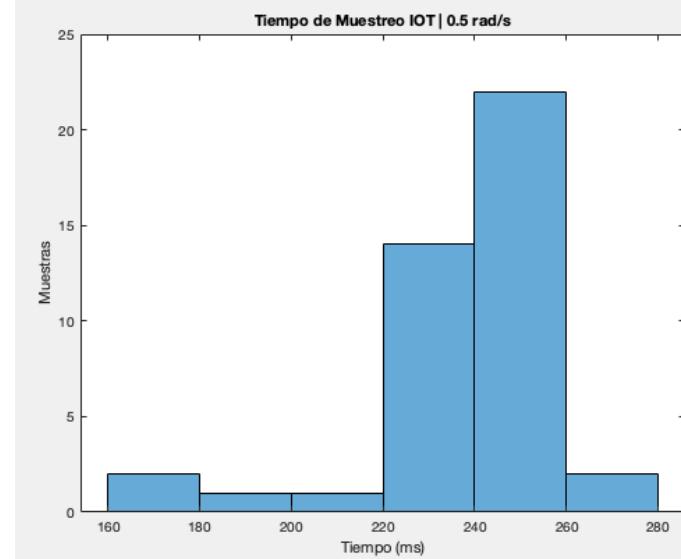


Figura 35. Verificación cumplimiento rango estado estable.

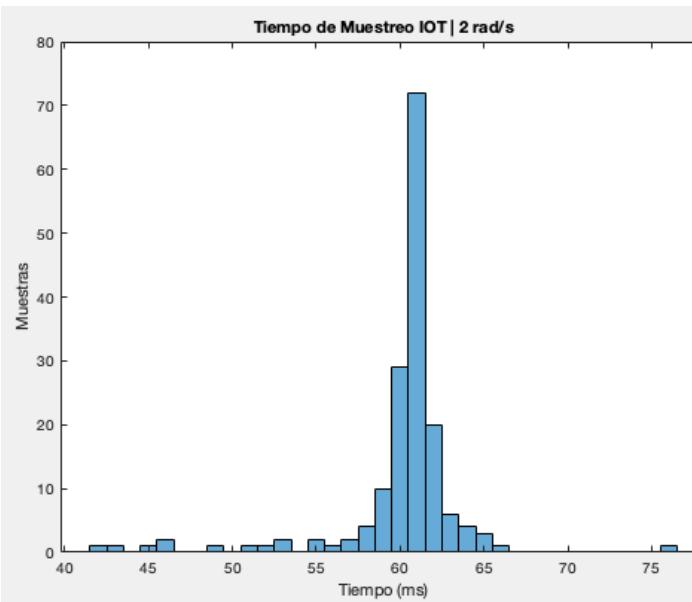
Se confirma que el ruido no es crítico y permite que el controlador cumpla con el 2% y 5% del valor del estado estable.

No obstante, se observan "inconsistencias" en el periodo de muestreo. A simple vista, podría pensarse que no cumple con el periodo de muestreo; sin embargo, por otro lado, esto se genera debido a limitaciones físicas del encoder. Con solo 52 pulsos por vuelta, a bajas velocidades, los pulsos van más lentos de lo esperado. Esto se verifica al observar el periodo de muestreo a diferentes velocidades.

0.5 rad/s



2 rad/s



4 rad/s

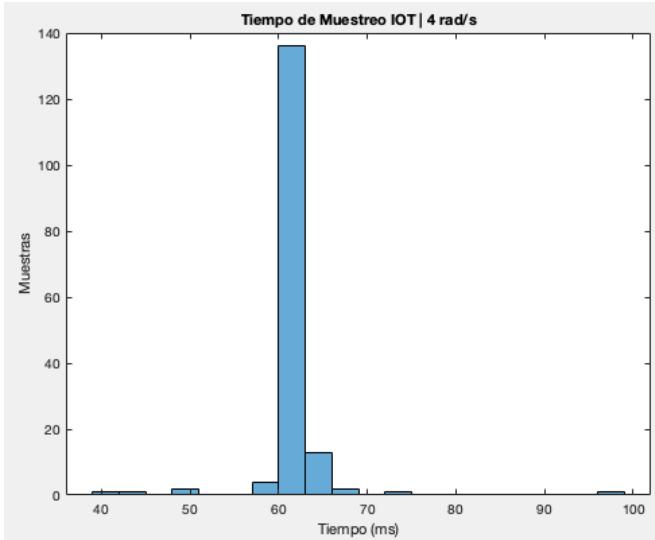


Tabla 10. Periodo de muestreo a diferentes velocidades.

Con base en lo anterior, se concluye que el límite físico del encoder, determinado por su resolución y la velocidad máxima de la banda con la caja reductora, oscila alrededor de 60 ms. Este límite no fue dimensionado en las primeras etapas de desarrollo del proyecto, pero no afecta el funcionamiento del controlador dentro de los rangos de trabajo establecidos en "Área de aplicación". Se confirma así el correcto funcionamiento para velocidades entre 10 cm/s y 30 cm/s, equivalente a 1.5 rad/s y 4.5 rad/s.

Es importante destacar que a velocidades bajas (0.5 rad/s), partiendo desde el reposo, se produce un sobreceso debido a la no linealidad del sistema. Esta dificultad se presenta especialmente cerca de la zona muerta y la zona de saturación, donde garantizar el correcto funcionamiento del controlador es complicado. Además, en este rango, la velocidad no cumple con el periodo de muestreo para el cual fue diseñado el controlador.

Las pruebas previas se llevaron a cabo utilizando el controlador PID convencional. En cuanto a la respuesta transitoria del controlador PI-D, se presenta a continuación:

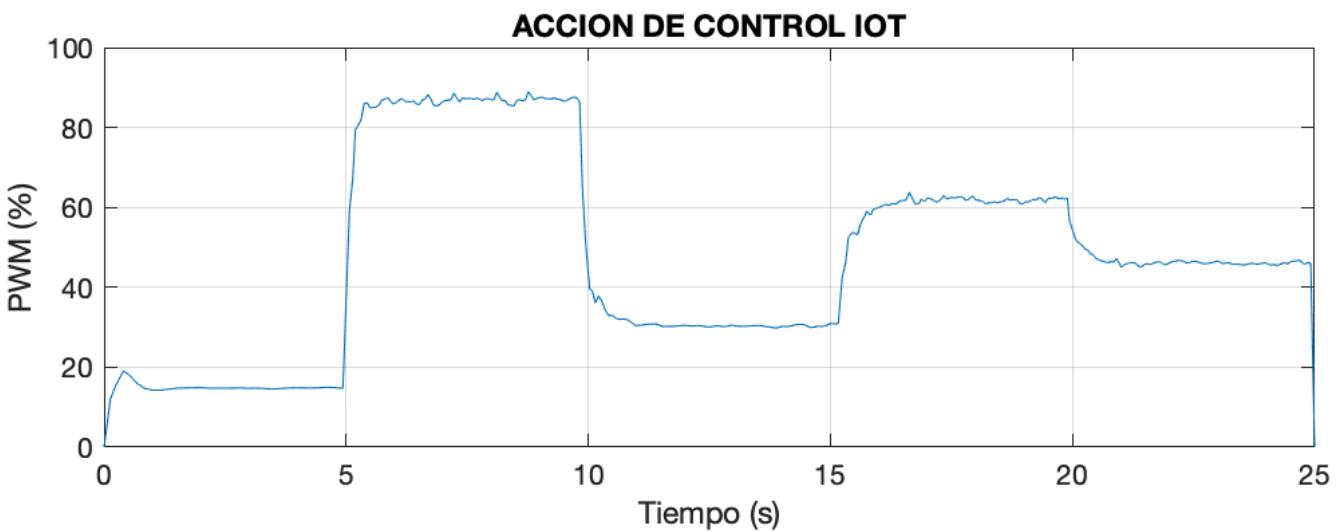


Figura 36. Respuesta transitoria Us acción de control PI-D.

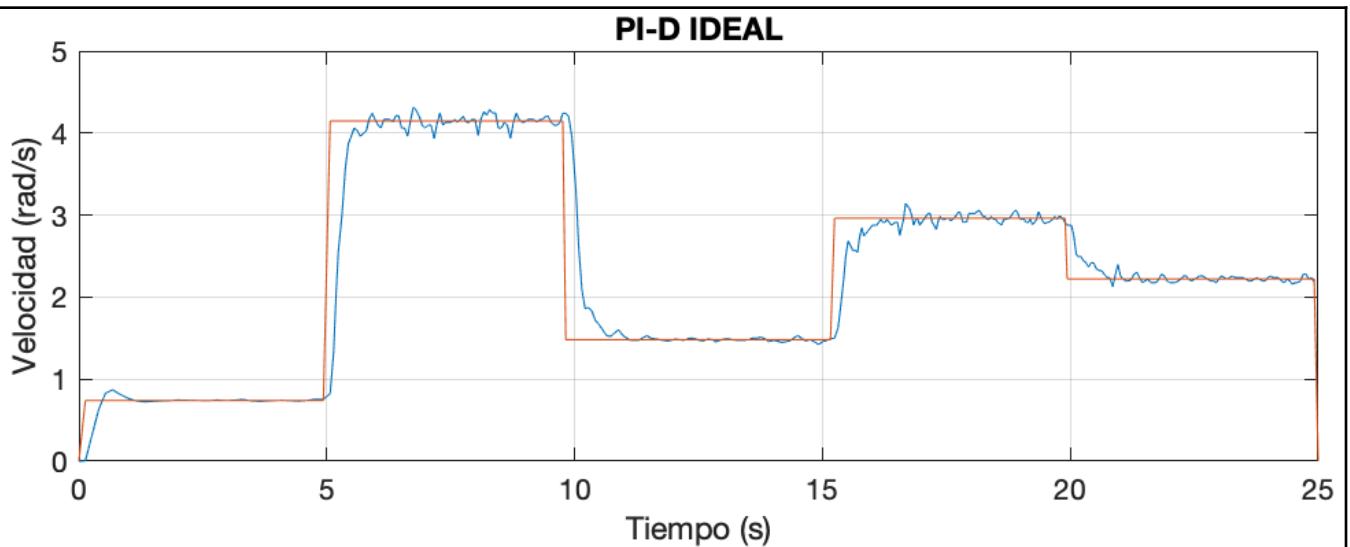


Figura 37. Respuesta transitoria Ys PI-D.

En el caso del controlador PI-PD, se observa que:

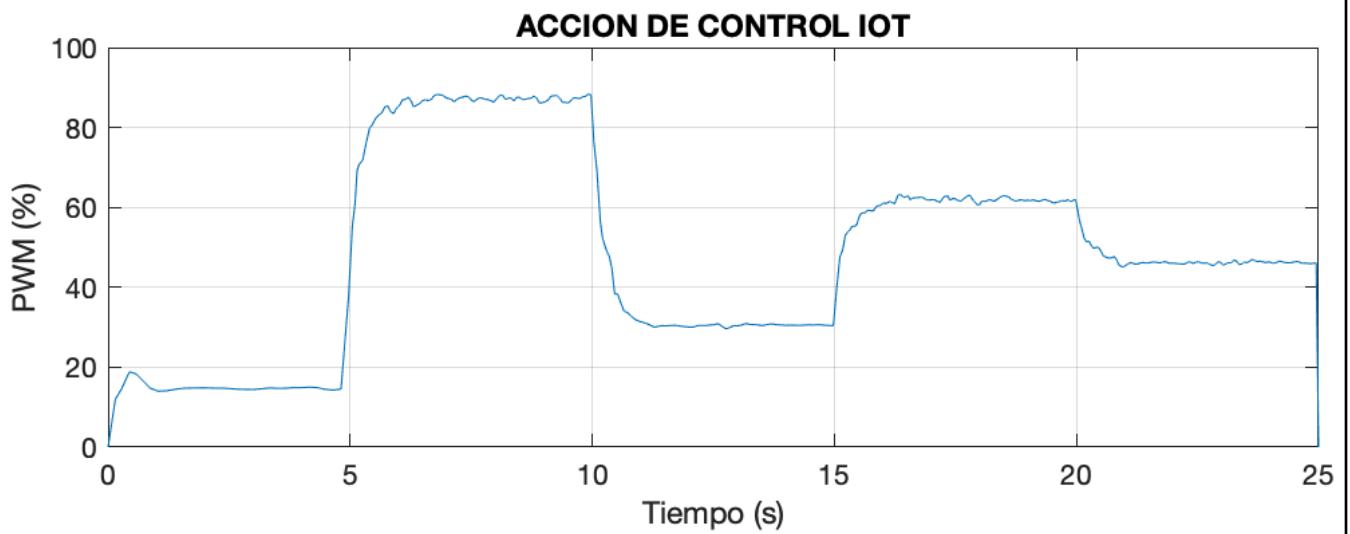


Figura 38. Respuesta transitoria Us acción de control PI-PD.

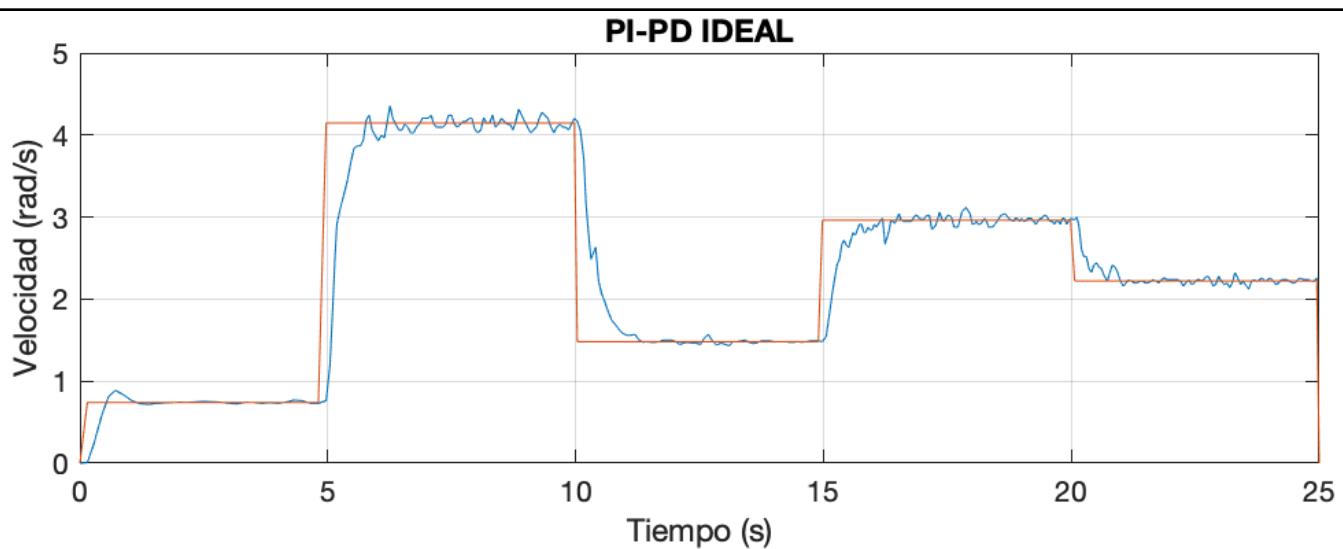


Figura 39. Respuesta transitoria Ys PI-PD.

Se detectan señales más ruidosas; no obstante, el controlador exhibe una reacción efectiva al seguir el punto de referencia. A pesar de esta variabilidad, el PID ideal demuestra ser la opción que proporciona los mejores resultados.

En este contexto, se procede a contrastar los datos experimentales (IOT PID ideal) con la simulación en Matlab. Este análisis final busca confirmar de manera concluyente la respuesta transitoria del sistema.

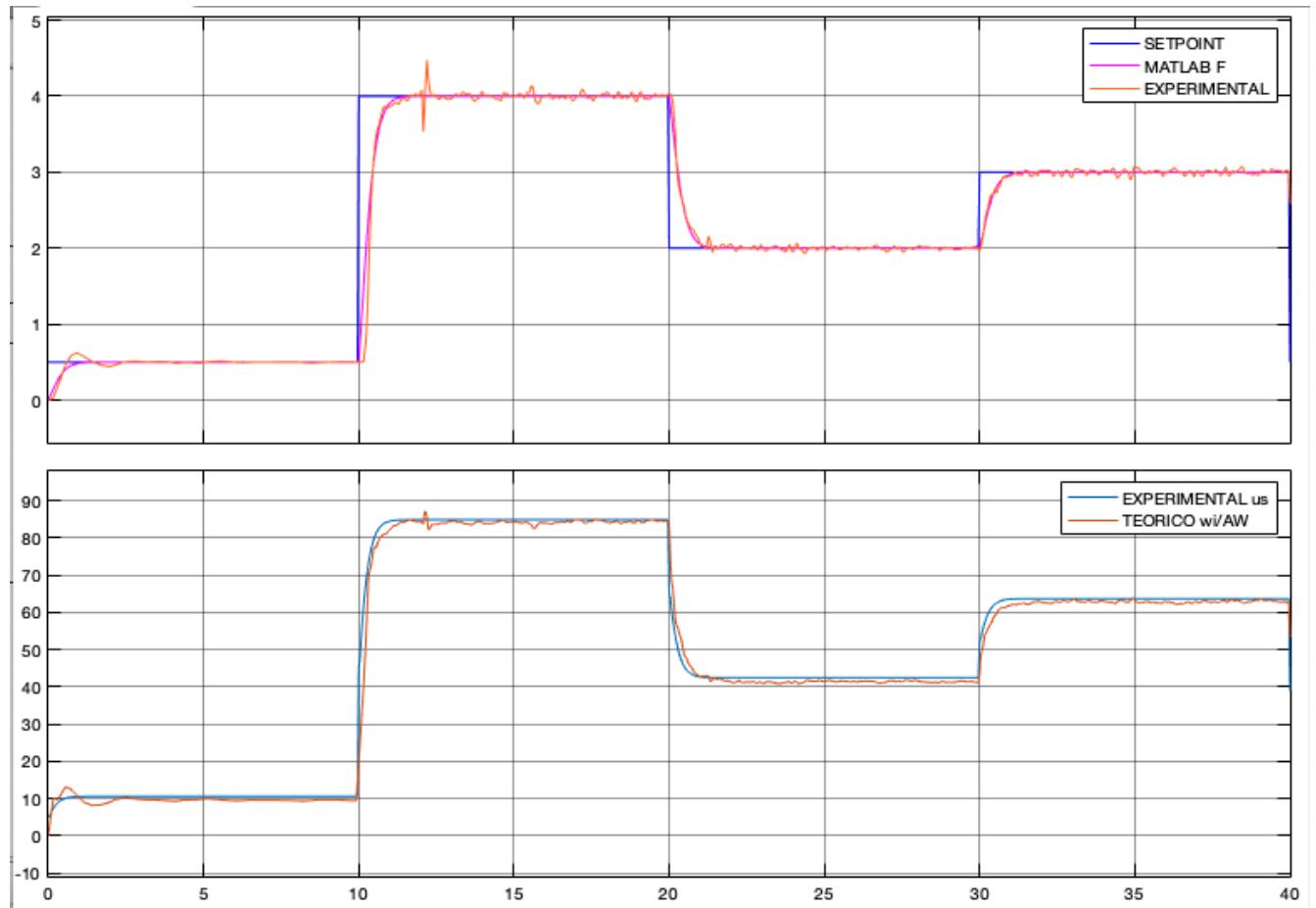


Figura 40. Respuesta transitoria a lazo cerrado con distintos puntos de referencia controlador PID SIMULADO VS EXPERIMENTAL.  
 Eje X: Tiempo (segundos)  
 Eje Y: Velocidad (rads/s)

## Conclusiones

## Anexos

### ANEXO 1:

La relación entre el flujo magnético y la corriente se expresa mediante la Ecuación 2.

$$[\Psi] = [L][I]$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{rr} & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{rr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} L_{ss} &= L_s + L_m \\ L_{rr} &= L_r + L_m \end{aligned}$$

Ecuación 2. Relación Entre el Flujo Magnético y la Corriente.

Cuando elegimos las corrientes como variables de estado, las ecuaciones que describen la dinámica de la máquina de inducción se presentan en las Ecuaciones 3 y 4, respectivamente.

$$\frac{d}{dt}[I] = -([L]^{-1}[R] + [L]^{-1}[\Omega][L])[I] + [L]^{-1}[V]$$

Ecuación 3. Corriente como variables de estado.

$$[L]^{-1} = \frac{1}{L_{rr}L_{ss} - L_m^2} \begin{bmatrix} L_{rr} & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_{rr} & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_{ss} & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_{ss} \end{bmatrix}$$

Ecuación 4. Matriz de inductancias inversa.

Por otro lado, el par electromagnético y la velocidad mecánica proporcionados por la máquina en el devanado del estator, en función de varias variables de estado, quedan definidos por las Ecuaciones 5 y 6, respectivamente.

$$T_e = \frac{3}{2} P_f L_m (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr})$$

Ecuación 5. Par electromagnético en función de variables de estado.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - b\omega_m - T_m)$$

Ecuación 6. Velocidad mecánica en función de variables de estado.

Se requiere una relación adicional, expresada en la Ecuación 7, dado que estamos interesados en la velocidad mecánica en lugar de la eléctrica. Esta relación se introduce en la ecuación de omegas en la Ecuación 8 de manera que:

$$\omega_{elect} = (P/2)\omega_{mech}$$

Ecuación 7. Relación velocidad eléctrica y mecánica.

```
omega = [0, -ws, 0, 0;
         ws, 0, 0, 0;
         0, 0, 0, -(ws-(p*wm));
         0, 0, (ws-(p*wm)), 0];
```

Ecuación 8. Matriz de omegas en función de variables de estado.

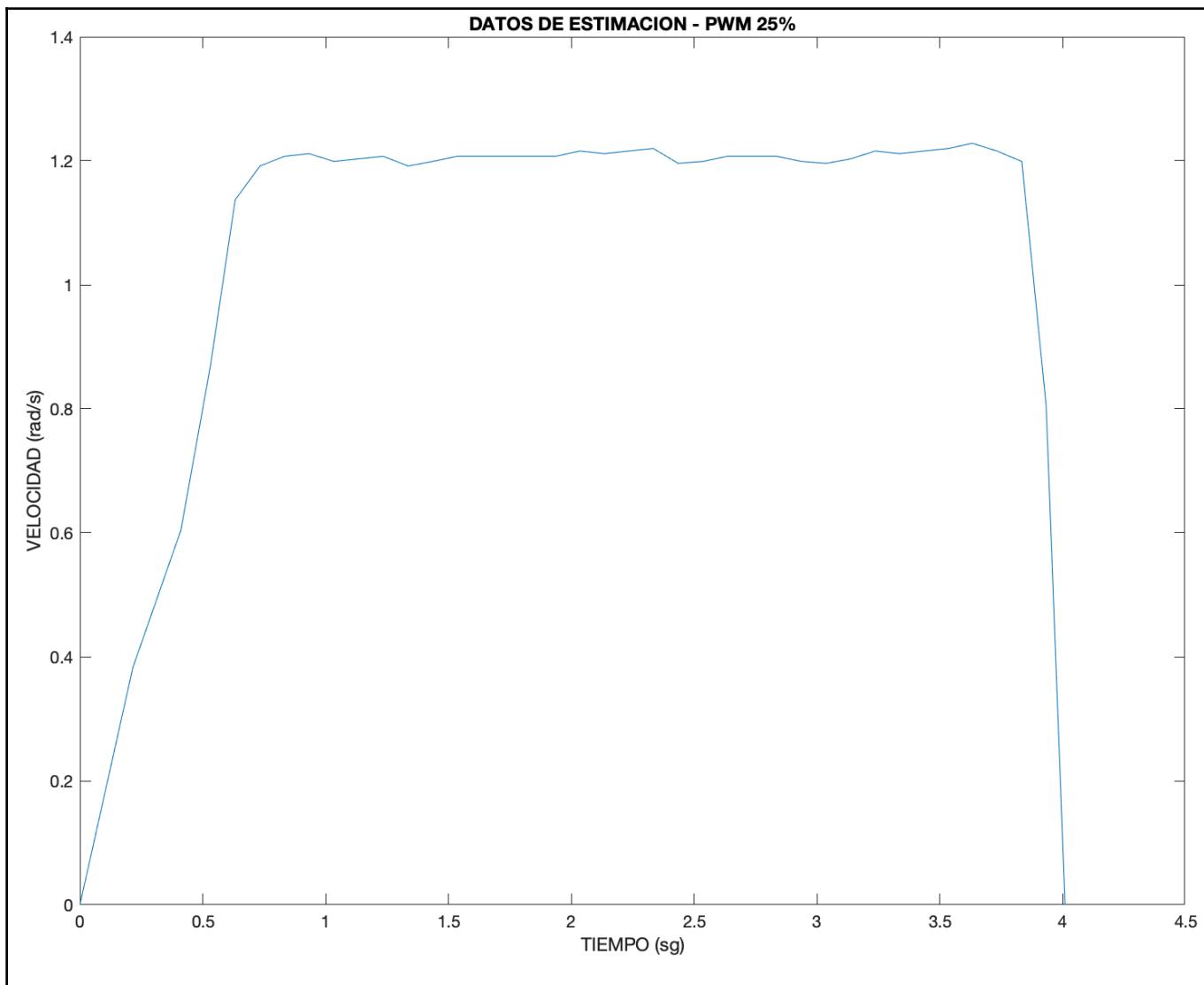
Finalmente tenemos como resultado las siguientes matrices:

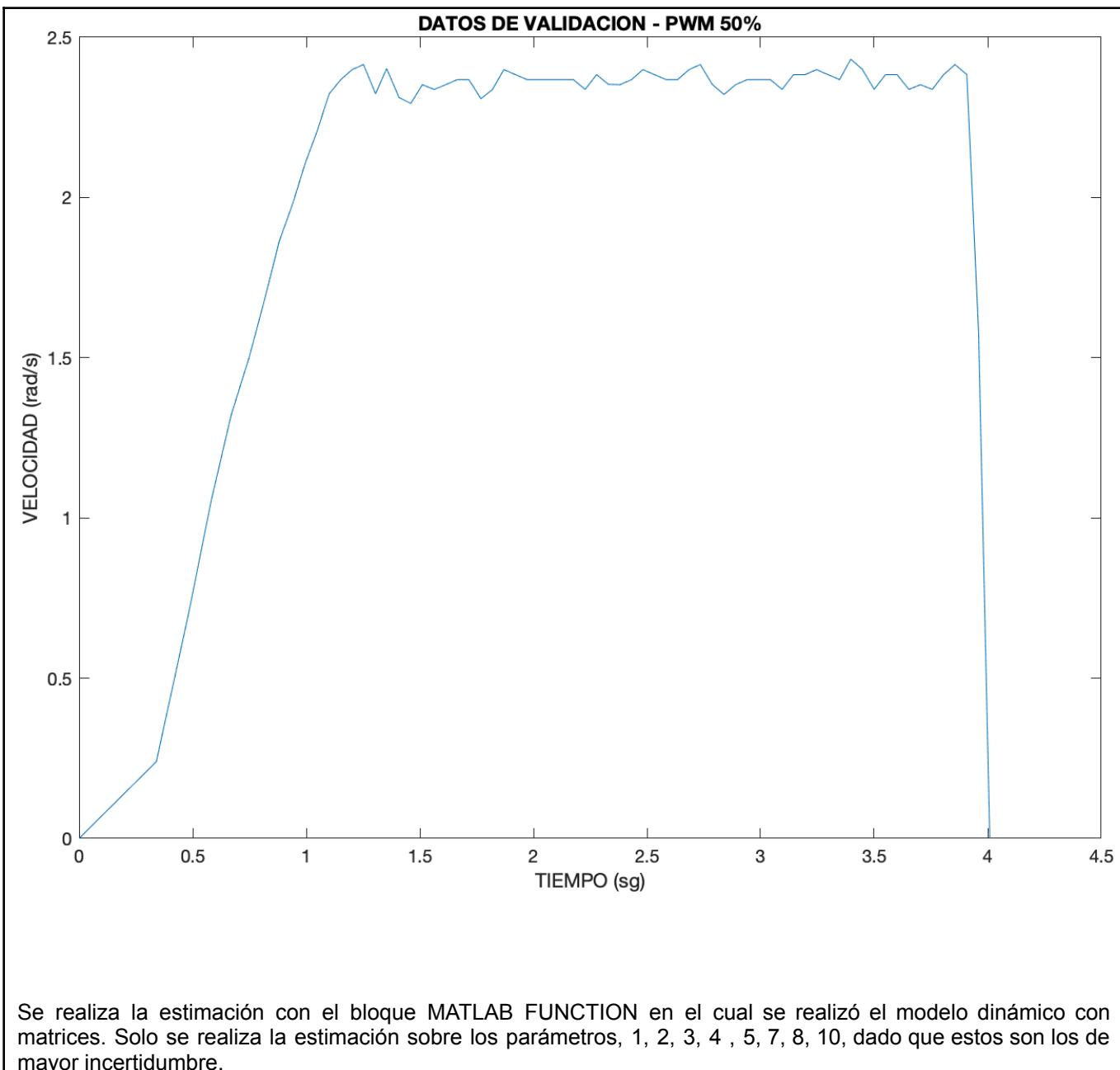
```
R = [Rs 0 0 0; omega = [0, -ws, 0, 0;
                         0 Rs 0 0; ws, 0, 0, 0;
                         0 0 Rr 0; 0, 0, 0, -(ws-(p*wm));
                         0 0 0 Rr]; 0, 0, (ws-(p*wm)), 0];
      L = [Ls+Lm, 0, Lm, 0;
            0, Ls+Lm 0, Lm;
            Lm, 0, Lr+Lm, 0;
            0, Lm, 0, Lr+Lm];
      V = [Vs;
            0;
            0;
            0];
      I = [Ids;
            Iqs;
            Idr;
            Iqr];
```

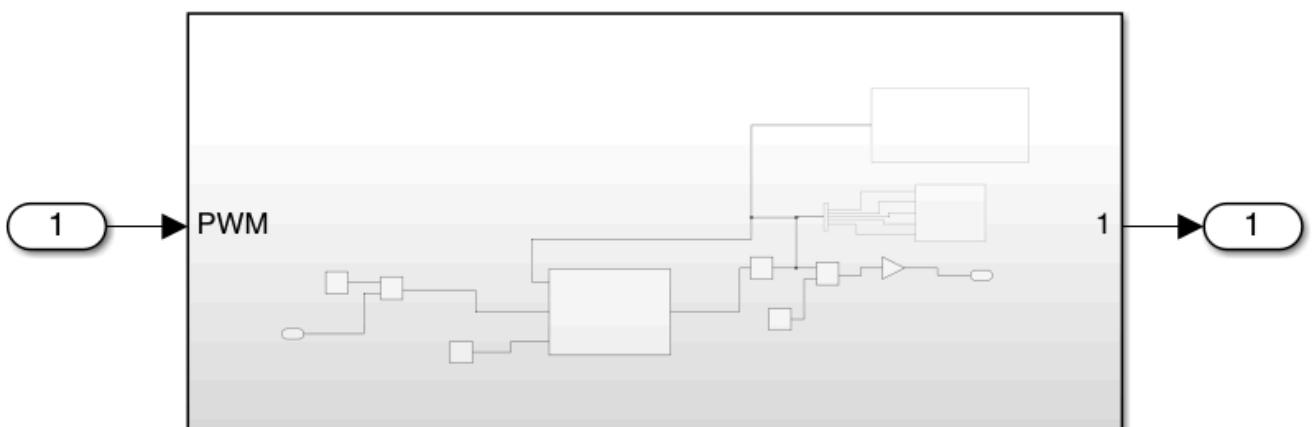
#### ANEXO 2:

Teniendo en cuenta los datos parámetros iniciales del monto de la librería de matlab 5 HP, 460V, 60Hz:

Se realiza un estimación de parámetros en los rangos operacionales de nuestra banda transportadora los cuales son, 25% y 50% de PWM, para este caso se tomaron datos por 4 segundos para los dos PWM anteriormente mencionados y se obtuvieron las siguientes gráficas:

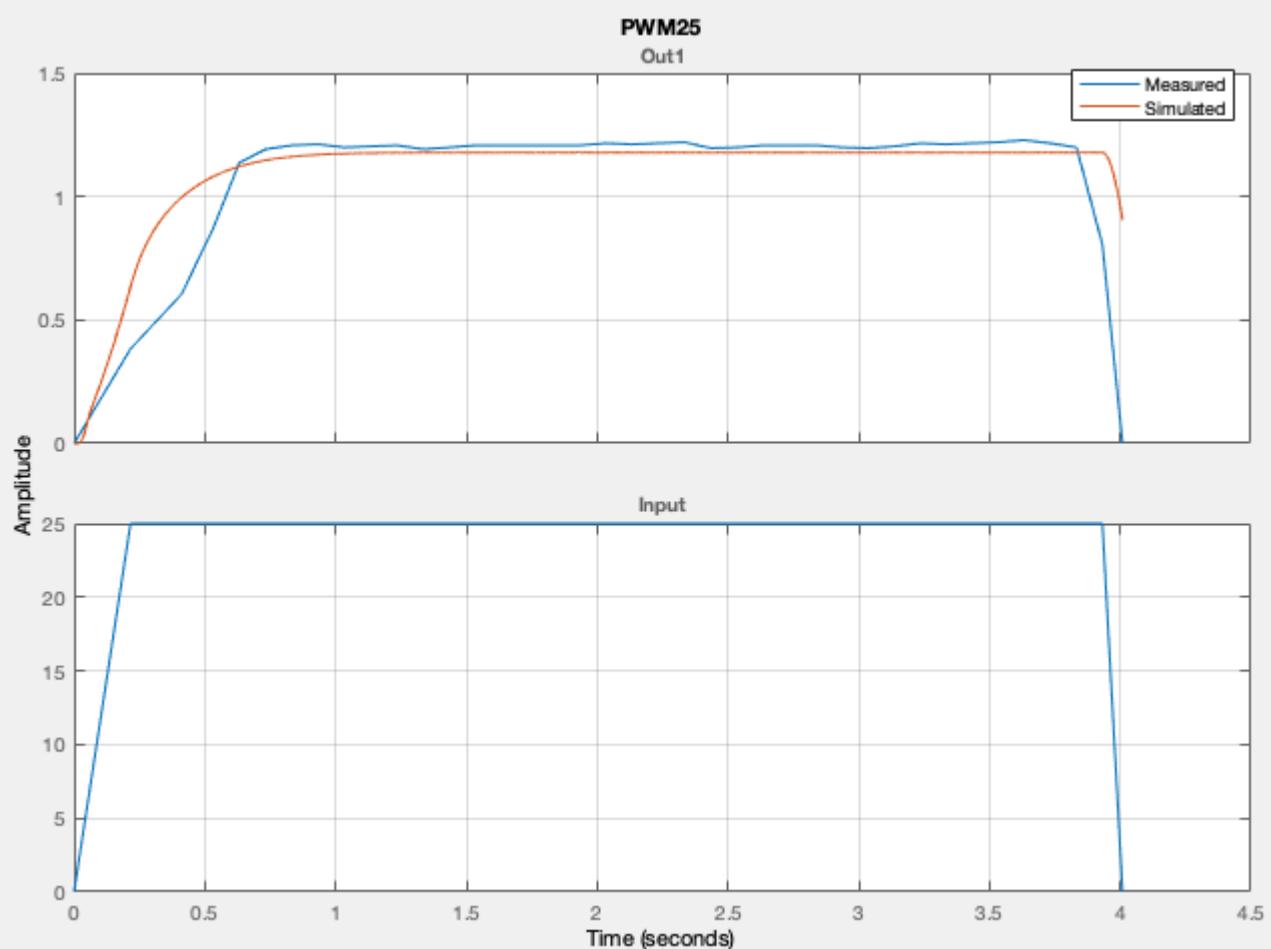


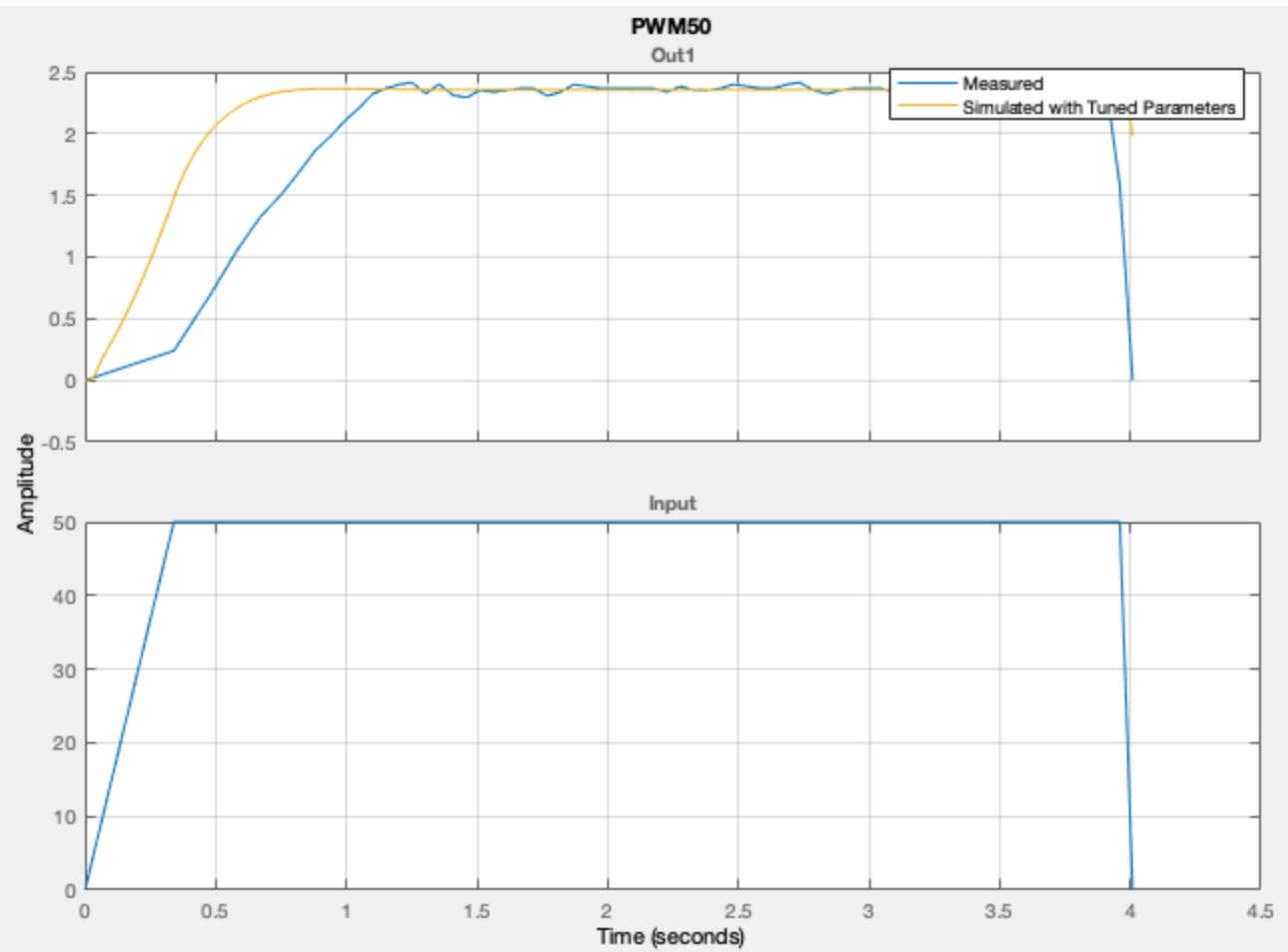




BLOQUE PARA ESTIMAR CON CAJA REDUCTORA

La mejor opción es realizar la estimación en 25% de PWM ya que en este punto la rampa de aceleración del variador tiene una pendiente mayor y permite un mejor resultado. Por otro lado, se realizaron varias estimaciones y la que mejor dio resultado fue el algoritmo “Levenberg-Marquardt”:

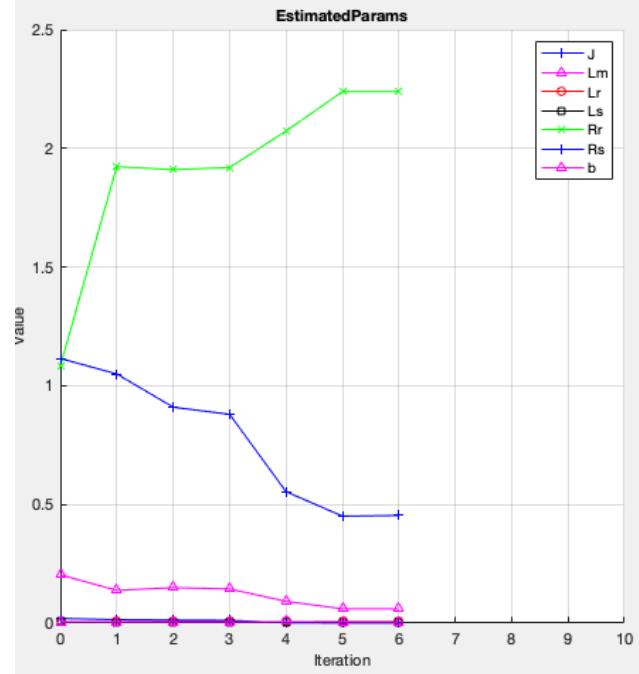




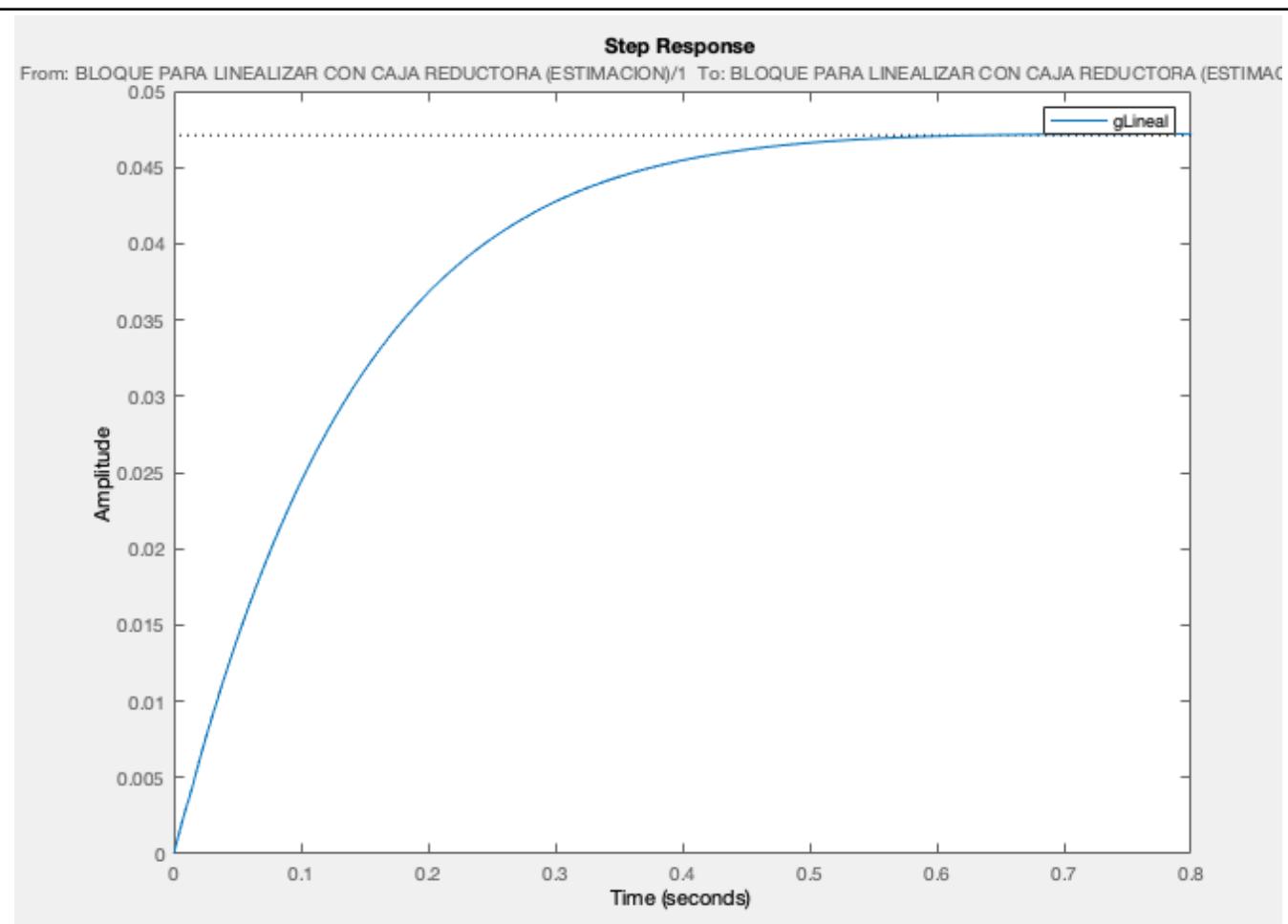
```
%DATOS MOTOR LIBRERIA
Lr = 0.005974;%1
Lm = 0.2037;%2
Ls = 0.005974;%3
Rr = 1.083;%4
Rs = 1.115;%5
p = 2;%6
J = 0.02;%7
b = 0.005752;%8
f = 60;%9
Vs = 220;%10
Kcj = 1/40%11
```

Parameter values:

```
J = 0.000708465775705982
Lm = 0.0599744390617798
Lr = 0.00664479606290913
Ls = 0.0040289456409115
Rr = 2.23921019090864
Rs = 0.453582712429716
b = 0.00556087584125463
```



Después de obtener los nuevos parámetros del modelo matemático se hace necesario linealizar el modelo matemático ya que este es no lineal, para esto se evita realizar la linealización alrededor de 0 ya que la respuesta transitoria será cero dado que los valores iniciales del motor son cercanos a cero, para esto tomamos un punto de linealización como valor inicial, para esto tomamos el punto de operación definido anteriormente para la banda transportadora el cual sera 25 % de PWM, se obtiene la siguiente respuesta transitoria para su correspondiente función de transferencia del modelo matemático linealizado de la banda transportadora con caja reductora.



## ANEXO 2:

Se hizo una aproximación en solidworks con pvc rígido ya que es la más cercana al UHMW encontrada en solidworks.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	24575.011	kgf/cm <sup>2</sup>
Coeficiente de Poisson	0.3825	N/D
Módulo cortante	8837.82657	kgf/cm <sup>2</sup>
Densidad de masa	0.0013	kg/cm <sup>3</sup>
Límite de tracción	415.02197	kgf/cm <sup>2</sup>

Figura 7. Propiedades materiales equivalentes.

Agregando sujetaciones inferiores donde va a estar fija y acoplada la pieza.

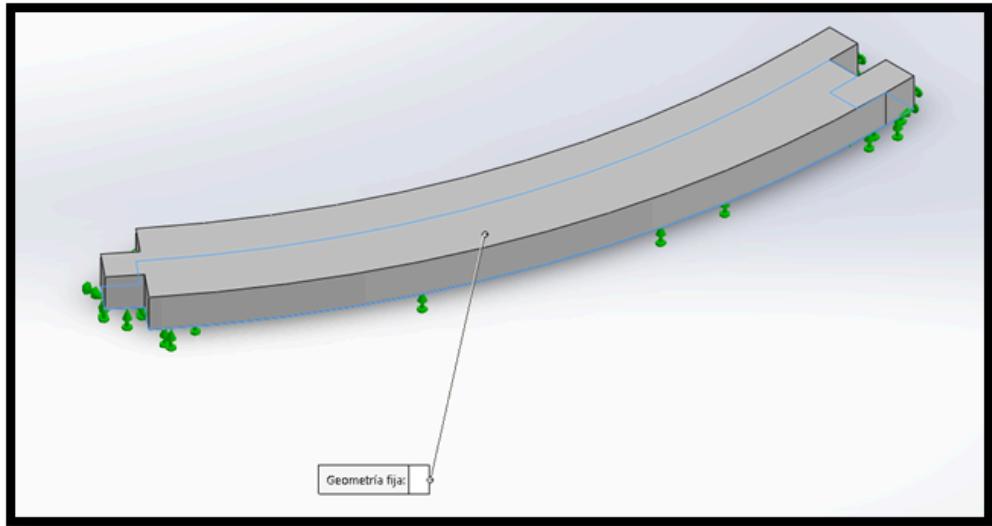


Figura 8. Sujeción aplicada.

Se agregó una fuerza distribuida de 100 newtons o aproximadamente 10 kilogramos fuerza.

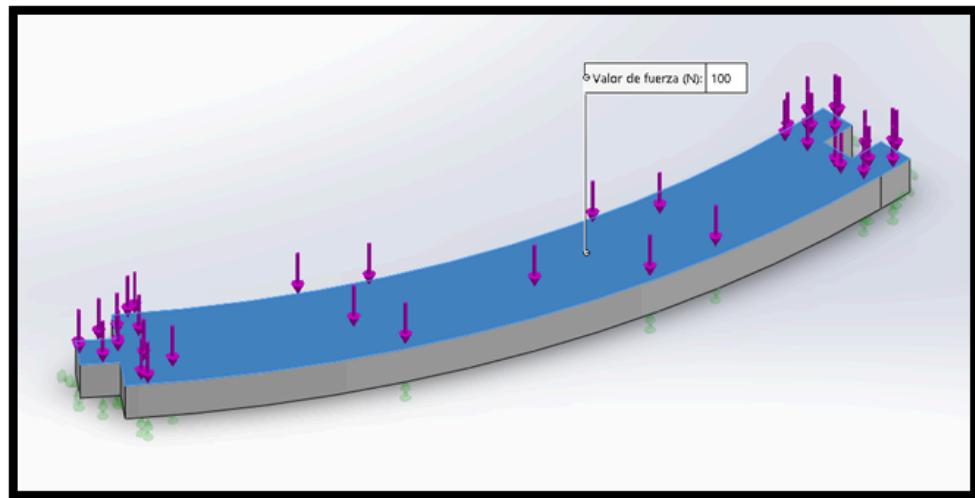


Figura 9. Fuerza distribuida.

Se generó una malla estándar con una tolerancia aproximada de 0.2mm y un tamaño global aproximado de 4 mm.

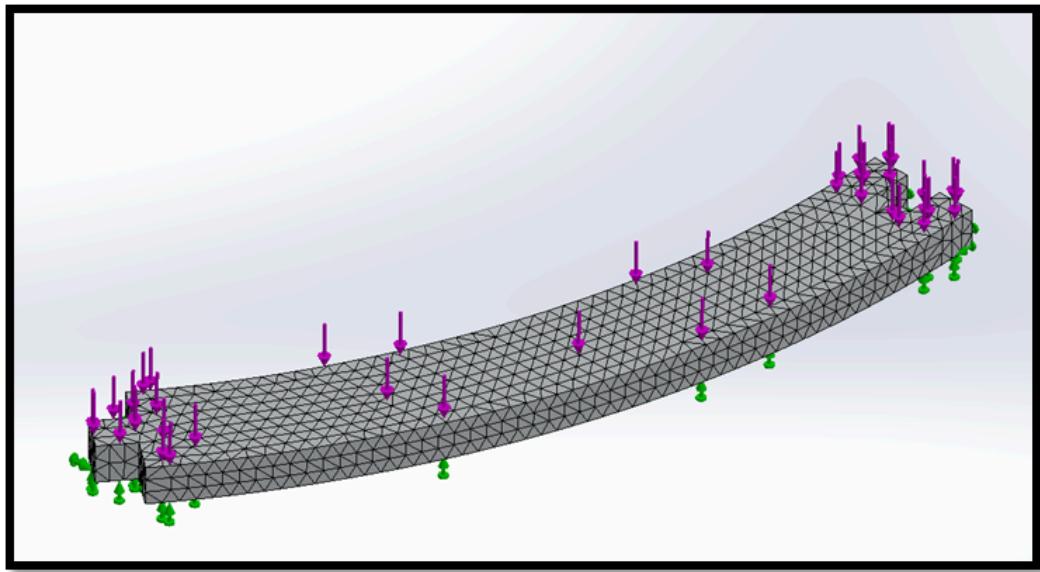


Figura 10. Mallado simulación.

Las tensiones de von mises esperadas son las siguientes donde la mayor son  $3.158 \times 10^4$  N/m<sup>2</sup> y la menor es  $5.237 \times 10^3$  N/m<sup>2</sup>.

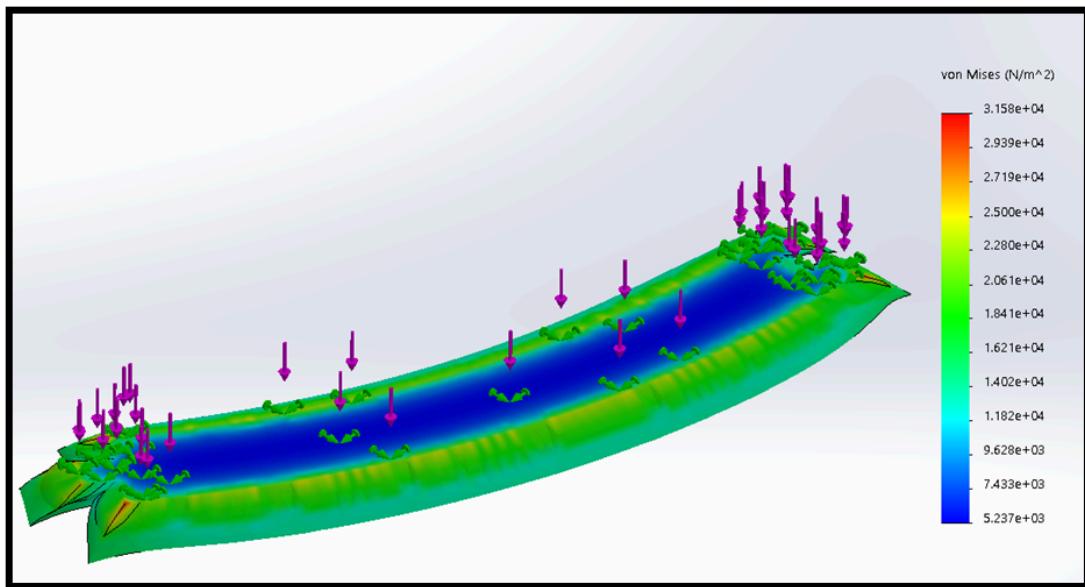


Figura 11. Esfuerzos de Von mises.

Las deformaciones unitarias son las siguientes donde la máxima ha sido de  $9.074 \times 10^{-6}$  y la mínima ha sido de  $2.224 \times 10^{-6}$ .

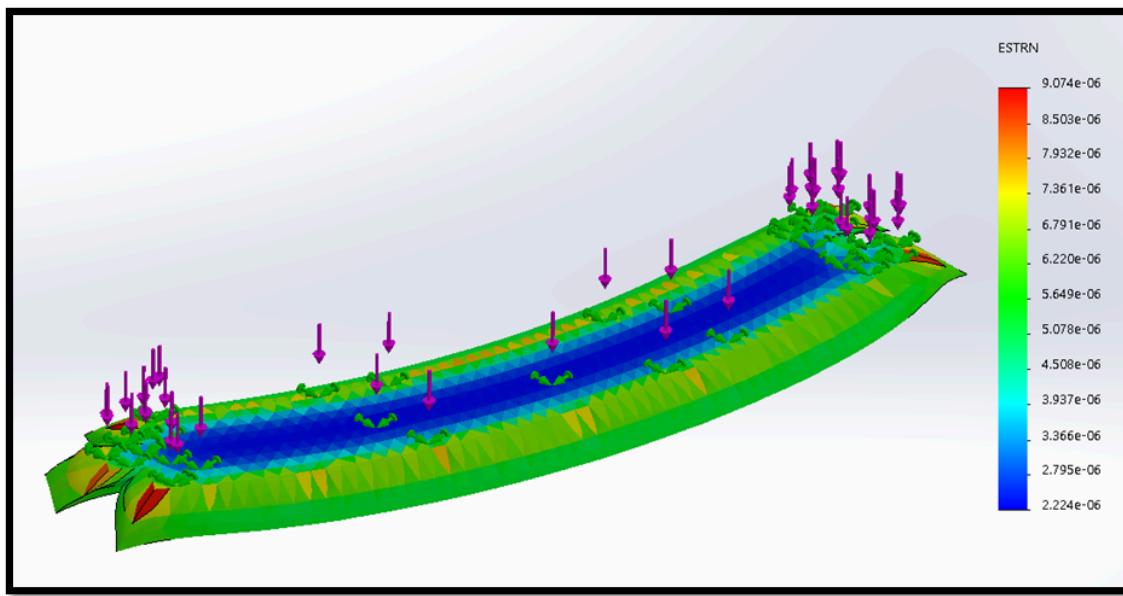


Figura 12. Deformación del material.

El Factor de seguridad (FOS) más bajo encontrado en el diseño es de 2485.01.

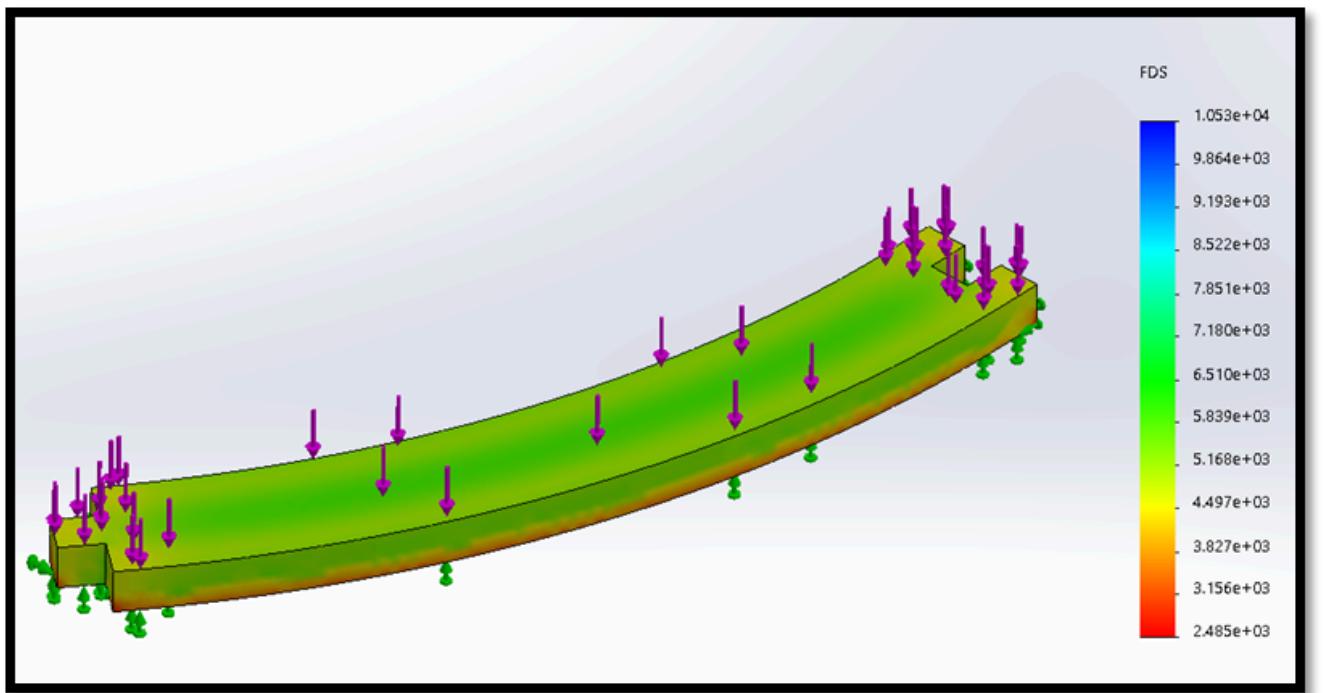


Figura 13. Factor de seguridad.

### ANEXO 3:

Para aumentar las probabilidades de éxito se decide diseñar un controlador de dos grados de libertad PI-D ideal:

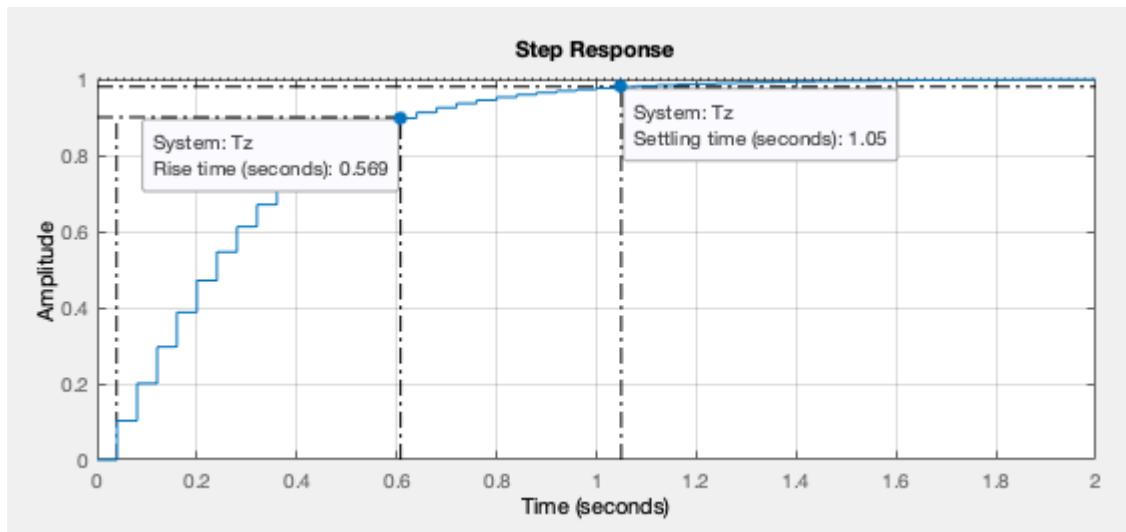


Fig 31. Respuesta transitoria Wout PI-D.

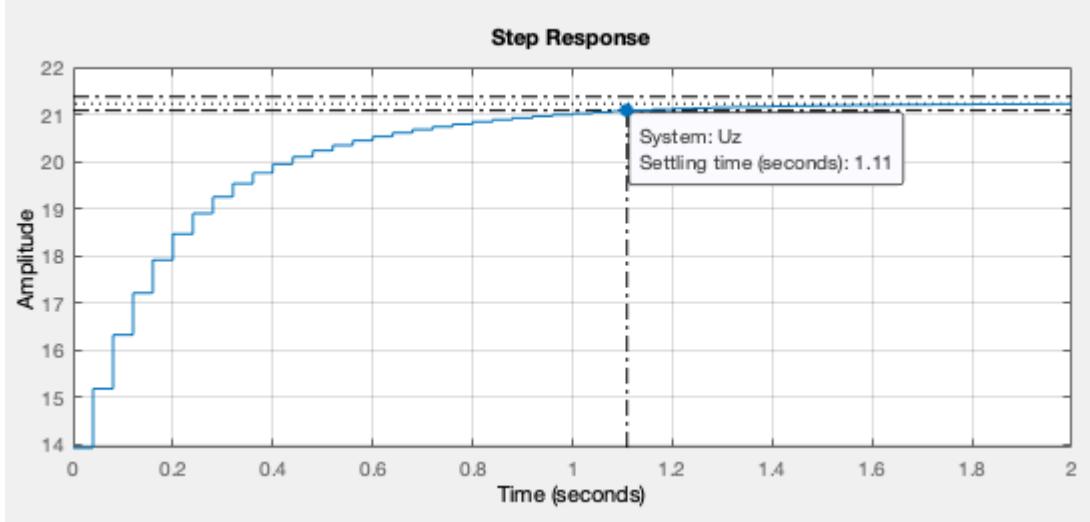


Fig 32. Respuesta transitoria acción de control PI-D.

$$C_{pi} =$$

$$\frac{13.93 z - 11.14}{z - 1}$$

Ecuación 9. Función de transferencia controlador PI ideal 2 DOF.

$$C_d =$$

$$\frac{z - 1}{z}$$

Ecuación 10. Función de transferencia controlador D ideal 2 DOF.

Se ha logrado diseñar un controlador PI-D óptimo que alcanzará el punto de referencia establecido y cumplirá con los criterios de diseño establecidos.

Una vez completado el diseño, se tomó la decisión de llevar a cabo simulaciones en lazo cerrado con distintos puntos de referencia.

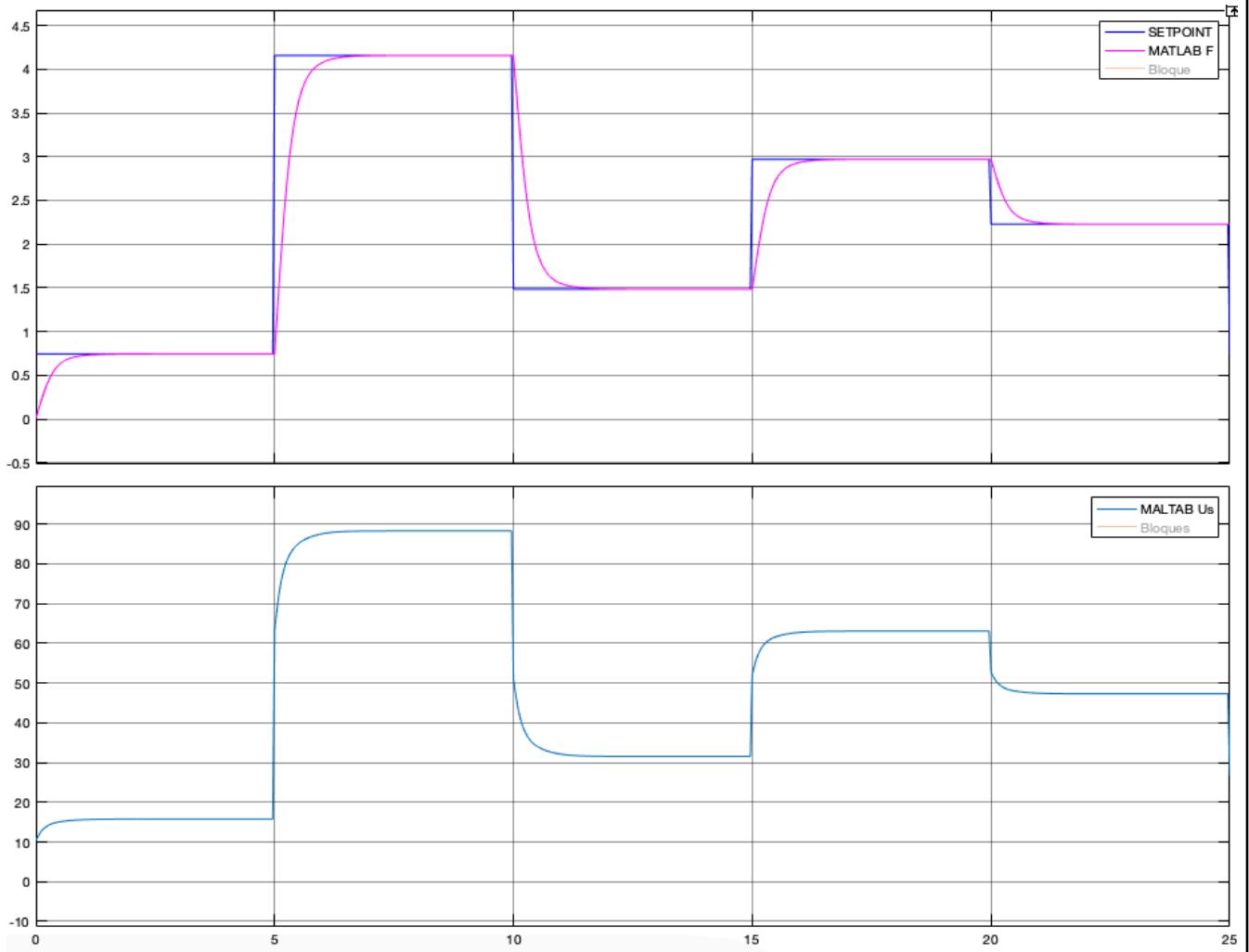


Figura 33. Respuesta transitoria a lazo cerrado con distintos puntos de referencia controlador PI-D.

Eje X: Tiempo (segundos)

Eje Y: Velocidad (rads/s)

Los resultados evidencian que el controlador de dos grados de libertad PI-D se ajusta eficientemente a las variables de consigna en un sistema de lazo cerrado.

k

Por último se decide diseñar otro controlador de dos grados de libertad, en este caso PI-PD ideal:

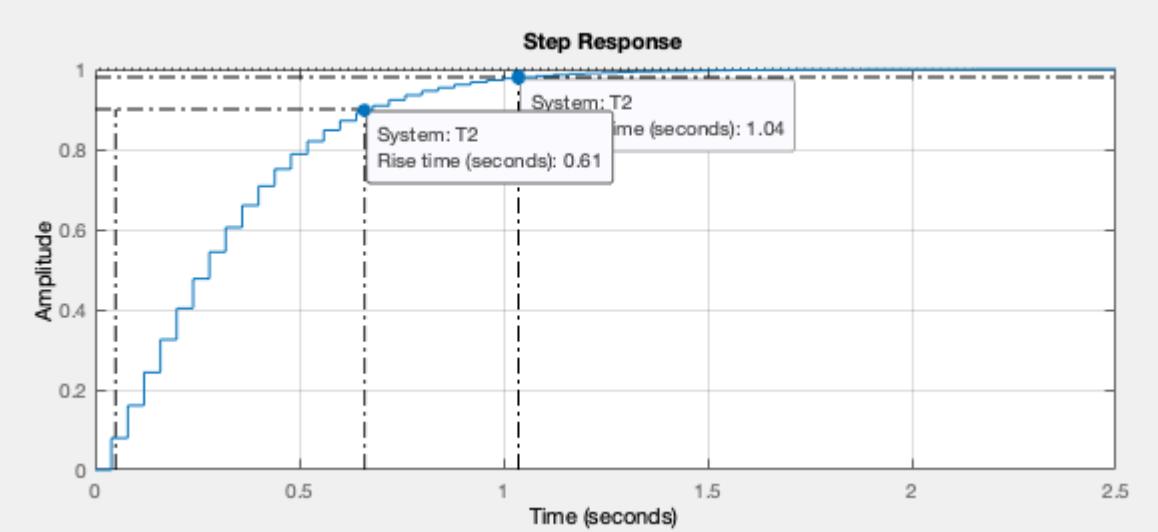


Fig 34. Respuesta transitoria Wout PI-PD.

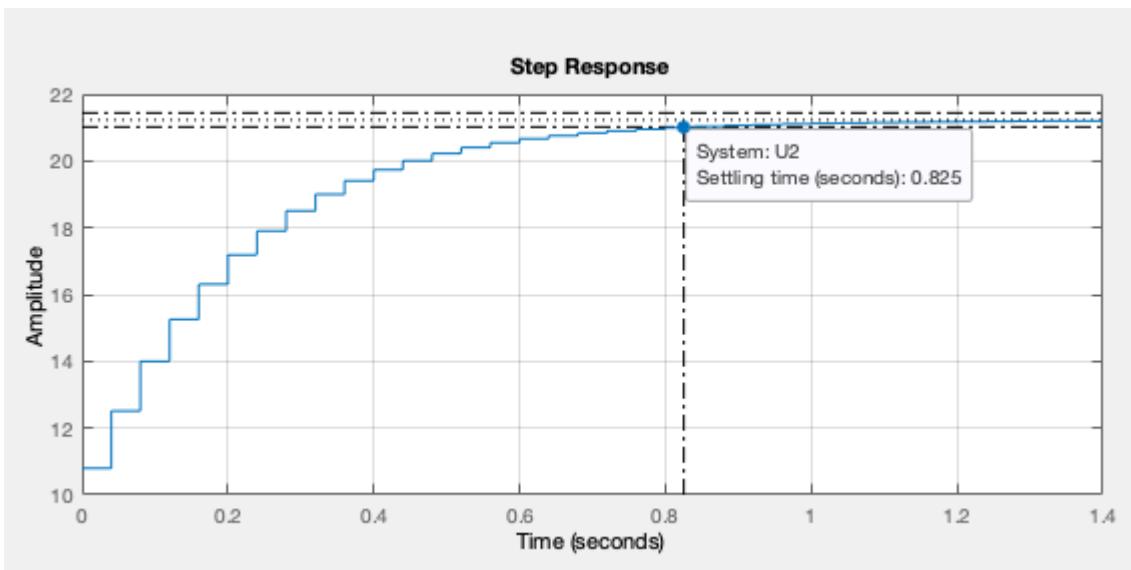


Fig 35. Respuesta transitoria acción de control PI-PD.

$$C_{pi} = \frac{10.8 z - 8.223}{z - 1}$$

Ecuación 9. Función de transferencia controlador PI ideal 2 DOF.

$$C_{pd} = \frac{z - 0.5686}{z}$$

Ecuación 10. Función de transferencia controlador D ideal 2 DOF.

Se ha logrado diseñar un controlador PI-PD óptimo que alcanzará el punto de referencia establecido y cumplirá con los criterios de diseño establecidos.

Una vez completado el diseño, se tomó la decisión de llevar a cabo simulaciones en lazo cerrado con distintos puntos de referencia.

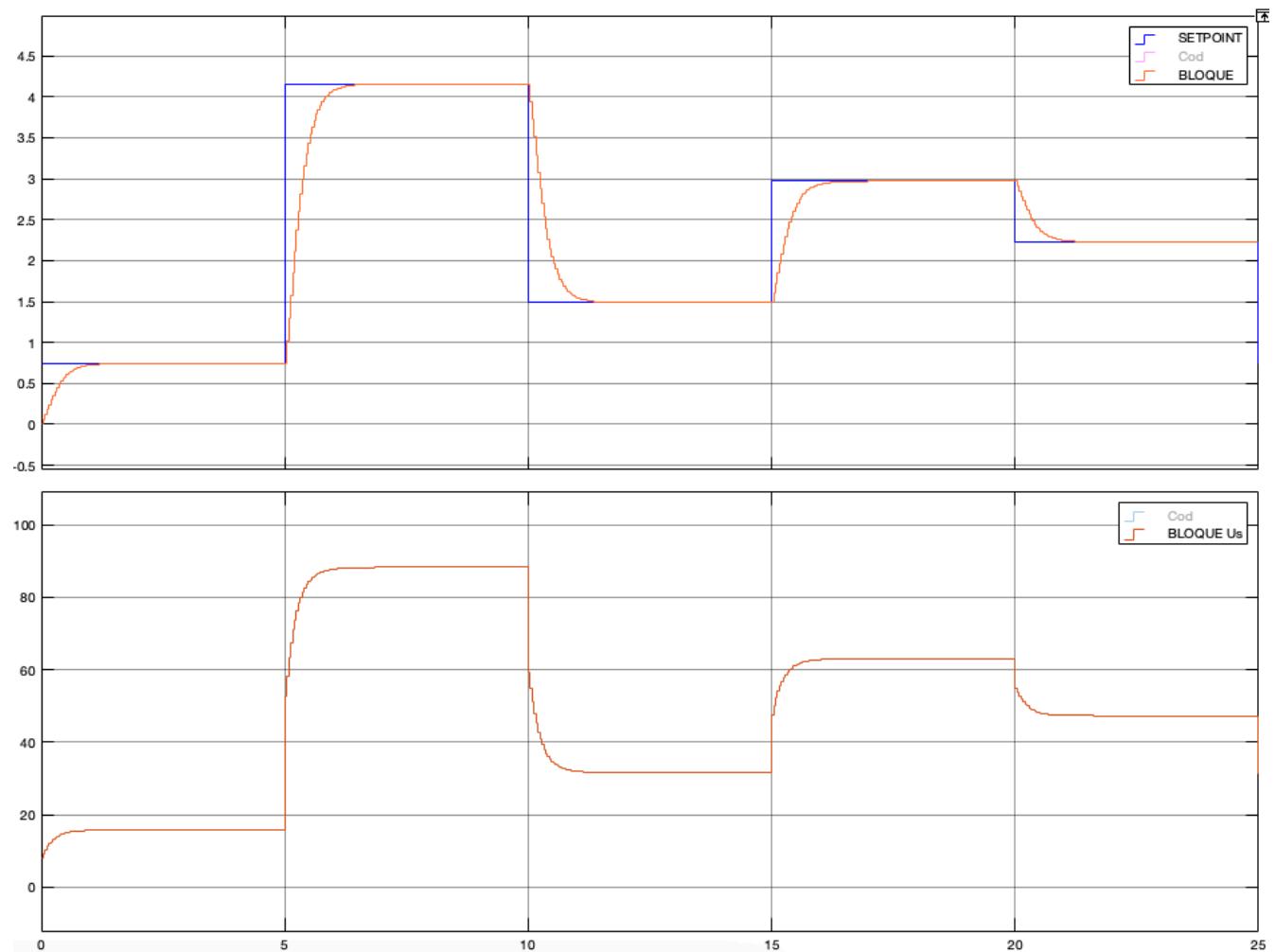


Figura 33. Respuesta transitoria a lazo cerrado con distintos puntos de referencia controlador PI-PD.

Eje X: Tiempo (segundos)

Eje Y: Velocidad (rads/s)

Los resultados evidencian que el controlador de dos grados de libertad PI-PD se ajusta eficientemente a las variables de consigna en un sistema de lazo cerrado.

#### Referencias bibliográficas

- [1] Cinta transportadora de 1500mm y 120W, botella de acero inoxidable de doble búfer, pegatina de 1000mm de longitud para impresora de inyección de tinta de alimentos, láser de fibra | - AliExpress. (s. f.). aliexpress.com.

- [https://es.aliexpress.com/item/1005005603581042.html?spm=a2g0o.productlist.main.57.85e35484bgzNG4&alg\\_o\\_pvid=f82d68f8-ce62-4a7c-a6ac-65796a39013d&algo\\_exp\\_id=f82d68f8-ce62-4a7c-a6ac-65796a39013d-28&p\\_dp\\_npi=4%40dis%21COP%213243696.53%211362369.23%21%21%21777.30%21%21%402101fb0b17004338355087593e5592%2112000033717642811%21sea%21CO%210%21AB&curPageLogUid=TCHGQTBy3dgL](https://es.aliexpress.com/item/1005005603581042.html?spm=a2g0o.productlist.main.57.85e35484bgzNG4&alg_o_pvid=f82d68f8-ce62-4a7c-a6ac-65796a39013d&algo_exp_id=f82d68f8-ce62-4a7c-a6ac-65796a39013d-28&p_dp_npi=4%40dis%21COP%213243696.53%211362369.23%21%21%21777.30%21%21%402101fb0b17004338355087593e5592%2112000033717642811%21sea%21CO%210%21AB&curPageLogUid=TCHGQTBy3dgL)
- [2] JEFFER SNEIDER, A. L. (2020). SISTEMA CIBERFÍSICO PARA LA SIMULACIÓN DE MÚLTIPLES BOMBAS CENTRÍFUGAS EN CONFIGURACIÓN VARIABLE MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE INDUSTRIA 4.0 [Proyecto de grado inédita]. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA.
- [3] SÁNCHEZ A., S., & GIRALDO, E. (2008). MODELADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN EN EL SISTEMA DE COORDENADAS DE CAMPO ORIENTADO DEL FLUJO DE ROTOR. (No 39), pp 89–93.
- [4] GONZÁLEZ ACEVEDO, H. (2008). MODELO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO. Universidad Industrial de Santander.
- [5] Model dynamics of three-phase asynchronous machine, also known as induction machine,in SI or pu units - Simulink- MathWorks América Latina. (s.f.). MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink - MATLAB & Simulink. <https://la.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html>
- [6] Gómez Sánchez, J. C. (2016). Caracterización, obtención y validación del modelo dinámico de un motor de inducción para tracción eléctrica, según la IEC 60034 [TRABAJO FIN DE GRADO inédito]. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA.