GUION DE PRÁCTICAS

**MODELADO, IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR DC CON ESP32 Y SIMULINK**

**Autor:**

**Sergio Fontanillo López**

**Tutores:**

**Eduardo Zalama Casanova José Candau Pérez**

**Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática**

**Julio – 2025**

ÍNDICE

[**1.** **OBJETIVOS** 4](#_Toc203325084)

[**2.** **PARTE A – IDENTIFICACIÓN (TRABAJO EN CASA)** 6](#_Toc203325085)

[**3.** **PARTE B – TRABAJO EN LABORATORIO** 12](#_Toc203325086)

[**3.1.** **INTRODUCCIÓN AL USO DE SIMULINK EN LA PRÁCTICA** 13](#_Toc203325087)

[**3.2.** **MODELO ESTÁTICO DEL SISTEMA** 17](#_Toc203325088)

[**4.** **CONTROL DE VELOCIDAD** 22](#_Toc203325089)

**ÍNDICE DE FIGURAS**

[Figura 1: Maqueta didáctica para prácticas. Elaboración propia. 4](#_Toc203325090)

[Figura 2: Modelado de la planta. Imagen extraída de la maqueta previa. 6](#_Toc203325091)

[Figura 3: Modelado del motor. Extraído de Motorpiic. 6](#_Toc203325092)

[Figura 4: Ecuaciones del modelo. 7](#_Toc203325093)

[Figura 5: Representación del modelo lineal en Simulink. Elaboración propia. 9](#_Toc203325094)

[Figura 6: Función de transferencia del sistema realizada en Simulink. Elaboración propia. 12](#_Toc203325095)

[Figura 7: Elementos de la maqueta de prácticas. Elaboración propia. 13](#_Toc203325096)

[Figura 8: Scope durante la simulación. Elaboración propia. 14](#_Toc203325097)

[Figura 9: Configuración de la planta y modelo. Elaboración propia. 15](#_Toc203325098)

[Figura 10: Representación durante la simulación. Elaboración propia. 18](#_Toc203325099)

[Figura 11: Tratamiento de datos al finalizar la simulación. Elaboración propia. 18](#_Toc203325100)

[Figura 12: Código para representación gráfica. Elaboración propia. 19](#_Toc203325101)

[Figura 13: Tensión (V) frente a velocidad (rpm). Elaboración propia. 20](#_Toc203325102)

[Figura 14: Tensión (V) frente a corriente (mA). Elaboración propia. 20](#_Toc203325103)

[Figura 15: Control de velocidad con controlador PI. Elaboración propia. 23](#_Toc203325104)

[Figura 16: Lazo cerrado del sistema con control PI. Elaboración propia. 24](#_Toc203325105)

**ÍNDICE DE TABLAS**

[Tabla 1: Tabla de símbolos y su descripción correspondiente. 4](#_Toc203325106)

[Tabla 2:Parámetros respectivos al modelo del motor. 7](#_Toc203325107)

[Tabla 3: Valores de corriente y velocidad para cada valor de tensión. 19](#_Toc203325108)

[Tabla 4: Cálculo de la ganancia K\_m. 21](#_Toc203325109)

1. **OBJETIVOS**

* Comprender el proceso de modelado dinámico de un motor de corriente continua.
* Identificar experimentalmente los parámetros eléctricos y mecánicos mediante señales de prueba.
* Implementar un modelo matemático en Simulink y compararlo con datos reales.
* Diseñar y sintonizar un controlador PID en Simulink y en el ESP32.
* Evaluar el comportamiento del sistema frente a perturbaciones y retardo.
* Familiarizarse con la transmisión de datos en tiempo real (Hardware-in-the-Loop).

Interfaz de usuario gráfica

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Maqueta didáctica para prácticas. Elaboración propia.

Tabla : Tabla de símbolos y su descripción correspondiente.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Variable** | **Descripción breve** | **Unidad** |
| Vm | Tensión aplicada en bornes del motor | Voltios (V) |
| I | Corriente circulante en el motor | Amperios (A) |
| I corr | Corriente efectiva corregida por offset | Amperios (A) |
| ω m | Velocidad angular del eje motor | radianes por segundo (rad/s) |
| ω salida | Velocidad angular de la salida de la reductora | radianes por segundo (rad/s) |
| rpm | Velocidad angular de salida en revoluciones por minuto | revoluciones por minuto (rpm) |
| T m | Par generado en el eje motor | Newton·metro (N·m) |
| T salida | Par generado en la salida de la reductora | Newton·metro (N·m) |
| K m | Constante de par motor referida al eje motor | Newton·metro por amperio (N·m/A) |
| K m (ap) | Constante de par motor aparente en la salida de la reductora | Newton·metro por amperio (N·m/A) |
| R m | Resistencia del devanado del motor | Ohmios (Ω) |
| J eq | Inercia equivalente referida al eje motor | kg·m² |
| n | Relación de reducción mecánica | (adimensional) |
| H motor (s) | Función de transferencia del motor (entrada tensión / salida velocidad eje motor) | (rad/s por V) |
| H salida (s) | Función de transferencia en la salida de la reductora | (rad/s por V) |
| K | Ganancia estática del sistema referida al eje motor | rad/(s·V) |
| G salida | Ganancia estática del sistema referida a la salida reductora | rad/(s·V) |
| τ (tau) | Constante de tiempo del sistema | segundos (s) |

1. **PARTE A – IDENTIFICACIÓN (TRABAJO EN CASA)**

Antes de realizar la práctica, es necesario conocer los principios básicos del modelado del motor. El sistema se puede reducir a un único bloque que denominamos planta (ver Figura 2). En la planta existen dos entradas (el valor de tensión establecido por el usuario y las fuerzas externas que actúan sobre el eje del motor o perturbaciones) y una salida (la velocidad del eje en revoluciones por minuto).

Imagen que contiene reloj

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Modelado de la planta. Imagen extraída de la maqueta previa.

Considerando una única corriente circulando a través de un conductor en un campo magnético, se puede calcular una expresión del par generado por el motor como función de la corriente y una expresión de la tensión de la fuerza contraelectromotriz en función de la velocidad de giro (como se realizó en el capítulo 2 de conceptos previos).

Diagrama, Esquemático

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Modelado del motor. Extraído de Motorpiic.

Se debe tener en cuenta que todas las expresiones matemáticas se realizan con unidades del sistema internacional (SI). (Ver Figura 3).

**Modelo eléctrico**:

Donde *um* es la tensión aplicada al motor (en voltios *V*), i(t) es la corriente que circula por la armadura (en amperios A), *Lm* es la inductancia del devanado (en henrios H), *Rm* la resistencia de la armadura (en ohmnios Ω), *Kb* es la constante de fuerza electromotriz (medido en *V·s/rad*) y w(t) es la velocidad angular del eje (en *rad/s*). El último término de la expresión “*Kbw(t)*” representa la fuerza contraelectromotriz: una tensión que se genera de forma instantánea en sentido contrario al avance del motor. Dado que *Lm* << *Rm* se puede despreciar la inductancia del motor.

**Modelo mecánico**:

Donde *Jm* es el momento de inercia del motor (expresado en *Kg·m2*), *Bm* es el coeficiente de fricción viscosa (*N·m·s*) y *Km* es la constante del par motor. Por tanto, el conjunto de ecuaciones que modelan al sistema es el siguiente:

Imagen de la pantalla de un celular de un mensaje en letras blancas

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Ecuaciones del modelo.

Tabla :Parámetros respectivos al modelo del motor.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Parámetro** | **Valor** | **Unidad** | **Descripción breve** |
| Constante de par motor (Km) | 0,0209 | *N·m/A* | Referida al eje motor (sin reductora) |
| Resistencia de armadura (Rm) | 1.9 | *Ω* | — |
| Inercia equivalente (Jeq=Jm) | 4,12·10-6 | *kg·m²* | Incluye inercia rotor y reductora |
| Relación de reducción (n) | 34 | *—* | Relación mecánica del reductor |
| Constante de tiempo (τ) | 0,00924 | *s* | — |

1. Usando las ecuaciones del motor mostradas a continuación. Dibujar el diagrama de bloques del sistema tomando como entradas *Vm* y *Tc* y como salida la velocidad del motor (*ωm*).

Es posible unificar el conjunto de ecuaciones presente arriba, con el fin de formar una única expresión dependiente de 4 variables f(*Tc, ω, ω´, Vm*) = 0.

Como *Im(t) = (1/Km) \* Tm(t)*, y además *Tm(t) = Jm \* (d(ωm(t)/dt) + n\*Tc)*, se obtiene la siguiente expresión. Sustituyendo estas ecuaciones en la primera descrita:

Al representarlo con diagramas de bloques en Simulink, el resultado es el siguiente:

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Figura : Representación del modelo lineal en Simulink. Elaboración propia.

Se realiza la transformada de Laplace para obtener la función de transferencia del sistema (el modelo presenta carácter lineal, por lo que no es necesario linealizarlo).

2. A partir del diagrama de bloque calcular la función de transferencia *𝐺𝑣(𝑠) = 𝜔m/𝑉m*, que relaciona la tensión aplicada al motor *Vm*, con su velocidad *𝜔m* sin tener en cuenta el par perturbador, es decir, anulando la entrada *Tc=0*.

Aplicando la transformada de Laplace, se obtiene:

Al plantear *Tc(s) = 0*, la función de transferencia *Gv(s)* resulta:

Como se puede apreciar, la función de transferencia presenta una naturaleza de un sistema de primer orden .

1. ¿Cuál será la ganancia estática del sistema y su constante de tiempo (parámetros *K* y *τ*) según la función de transferencia normalizada de primer orden? Se debe tener en consideración

La ganancia estática es cuando el valor *s = 0*:

Esta ganancia procede de la relación entre la velocidad del eje motor (sin reductora) y la tensión aplicada. Por ello, se debe aplicar la conversión para obtener la ganancia con relación a la velocidad de salida de la reductora:

Para el cálculo de tau (*𝜏*), se reescribe la función de transferencia para obtener en el denominador la expresión *𝜏s + 1*.

La función de transferencia con la salida reductora es la siguiente:

4. A partir del diagrama de bloques, calcular la función de transferencia *GTC (𝑠) = 𝜔m/𝑇c*, debida al par de carga perturbador introducido desde el último piñón, es decir, considerando la entrada *Vm=0*. Usar los parámetros *KTC* y *𝜏TC* definidos como: .

Si ahora se iguala a cero la entrada del motor *V(s)*, obtenemos la siguiente expresión:

Se puede deducir que es un sistema de primer orden, además de poseer una ganancia negativa con respecto al anterior sistema.

Para obtener 𝜏TC, dividimos a ambos lados de la expresión *GTC(s)* por *Km2*, resultando en la siguiente expresión:

Se observa cómo 𝜏𝑇𝑐 y 𝜏 son iguales. Sin embargo, la ganancia es positiva para la entrada V(s), y negativa para la perturbación Tc(s). Esta última tiene un valor muy elevado.

6. Dibujar el diagrama de bloques resultante final del sistema considerando como entradas la tensión aplicada al motor y el par de carga perturbador, y como salida la velocidad angular del volante, utilizando las funciones de transferencia calculadas en el paso anterior.

Tomando las funciones de transferencia G1(s) y G2(s), se obtiene:

Realizando el diagrama de bloques de la suma de funciones de transferencia del sistema en Simulink, se obtiene lo siguiente:

Diagrama

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Función de transferencia del sistema realizada en Simulink. Elaboración propia.

1. **PARTE B – TRABAJO EN LABORATORIO**

**Material necesario:**

* Maqueta con ESP32 DevKit V1.
* Motor DC con encoder incremental.
* Puente H L298N.
* Sensor de corriente + OpAmp LM358P.
* Pantalla LCD I2C y encoder KY-040.
* Fuente de alimentación regulada (12 V, mínimo 2 A).
* Cable USB para comunicación.
* Ordenador con MATLAB/Simulink y script postSimAnalysis.m.

Interfaz de usuario gráfica, Sitio web

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Elementos de la maqueta de prácticas. Elaboración propia.

**Consideraciones:**

* Verificar que el cable USB y el puerto COMx estén correctamente configurados antes de comenzar.
* Confirmar la velocidad de baudios en Simulink (por defecto: 115200).
  1. **INTRODUCCIÓN AL USO DE SIMULINK EN LA PRÁCTICA**

El apartado de modelado se realiza en Simulink, donde se representa el motor en lazo abierto aplicando la tensión de entrada definida en el bloque de fuente de señal o bien desde la maqueta con la pantalla y encoder (puede ser una señal escalón, rampa o cualquier forma de onda que se configure en el generador de señal dentro del modelo).

Durante la simulación, se dispondrá de dos ventanas de visualización que mostrarán simultáneamente:

* La velocidad angular del eje con reductora en revoluciones por minuto.
* La tensión aplicada al motor.

Ambas gráficas se pueden superponer en una única ventana (Scope) para facilitar el análisis comparativo durante la simulación.

Diagrama, Esquemático

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Scope durante la simulación. Elaboración propia.

El software permite además simular el comportamiento de un sistema de primer orden mediante un subsistema equivalente en Simulink. La salida simulada se puede visualizar en la misma gráfica junto con la salida “real” obtenida del modelo dinámico detallado (o de los datos experimentales importados).

Por defecto, el color de la traza de la simulación es azul, mientras que la traza del sistema real es roja. No obstante, ambos colores se pueden cambiar desde las propiedades de los bloques de visualización (Scope) o mediante scripts de post-procesado en MATLAB. La velocidad de salida del simulador se calcula con la siguiente función de transferencia que se implementa en Simulink. Por otro lado, el subsistema permite la selección de las entradas a la planta (elegir si emplear el sistema de interfaz de la maqueta, o los bloques de funciones en Simulink), además de establecer los parámetros del modelo como K, τ, KTc y τTc.

Interfaz de usuario gráfica, Texto, Aplicación, Word

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Configuración de la planta y modelo. Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura, los parámetros K, τ, KTc y τTc pueden configurarse desde la máscara del bloque de la planta o asignarse desde el espacio de trabajo de MATLAB. La simulación se ejecuta con un periodo de muestreo de 20 ms (50 Hz), lo que permite aproximar el comportamiento continuo del sistema sin introducir errores significativos. Para llevar a cabo la práctica correctamente, se recomienda seguir estos pasos:

1. **Alimentar la maqueta y verificar señales**
   * Conecte la maqueta a la red eléctrica.
   * Compruebe los indicadores de encendido (diodos luminosos).
2. **Identificar la maqueta o modelo asignado:**

Si se trabaja con un modelo físico asociado, anote el número de identificación de la maqueta (ubicado en su base) y refleje este número en todos los informes. Si se trabaja solo en Simulink, identifique el archivo del modelo (.slx) que se utilizará.

* + Asegúrese de que el ordenador tiene instalado MATLAB y Simulink, con los paquetes “Instrument Control Toolbox” y “Embedded Coder”.
  + Verifique que el bloque de comunicación (por ejemplo, Serial Receive) esté correctamente configurado con el puerto y velocidad adecuados.
  + Conecte el USB al ordenador y la maqueta.

1. **Abrir el modelo Simulink Motor.slx con la misma ruta de carpeta.**
   * Localice y abra el archivo del modelo.
   * Revise los bloques de parámetros configurables (tensión de entrada, valores de K, τ, KTc y τTc).
2. **Verificar configuración de simulación**
   * Elija el tipo de práctica (como es en Simulink, el diodo debe ser azul).
   * Configure los parámetros del generador de señal.
   * Compruebe que los valores de muestreo y duración de simulación son los adecuados (por defecto, 0,02 s de periodo de muestreo y 10 s de duración de onda).
3. **Iniciar la simulación**
   * Pulse el botón **RUN** (play) en la barra de Simulink.
   * Observe que la simulación y maqueta se ejecutan sin errores.
   * Verifique que las gráficas se actualizan en tiempo real.
   * Realizar análisis al finalizar la simulación con el postratamiento de los datos.
4. **Analizar resultados**
   * Compare la salida del modelo de primer orden con la respuesta del sistema detallado.
   * Use panel de control en el script.m generado para ajustar la visualización y hacer zoom.
   * Si es necesario, exporte los datos a Excel para post-procesado.
5. **Detener la simulación**
   * Pulse **STOP** en Simulink.
   * Los datos quedarán disponibles para análisis y exportación.
   * Si el tiempo de conexión finaliza antes de iniciar la simulación, la maqueta mostrará un mensaje de error. Es necesario detener la simulación y volver a pulsar en **RUN**.

**Importante**:

* Los valores que se introducen en los parámetros del modelo deben respetar los límites definidos para evitar resultados erróneos o inestables.
  1. **MODELO ESTÁTICO DEL SISTEMA**

Objetivo: Estimar los parámetros dinámicos del sistema mediante respuesta al escalón. El procedimiento será el siguiente: se deberá configurar la maqueta en “Modo Simulink” (Indicador LED en azul. Grabar la configuración en la EEPROM). Posteriormente, verificar en el archivo de Simulink que se está trabajando en lazo abierto.

Como usuario, enviar escalones de tensión con saltos en la amplitud de 2V hasta alcanzar 12V (este paso es posible realizarlo configurando las entradas en Simulink, o bien desde la interfaz HMI de la maqueta. IMPORTANTE: marcar/desmarcar la casilla “Editar entradas en Simulink” según la elección escogida). Registrar la velocidad y la corriente en tiempo real con el ESP32.

Determinar:

* **Ganancia estática (K):** Relación entre tensión aplicada y velocidad en régimen permanente.
* **Constante de tiempo (τ):** Tiempo aproximado en el que el sistema alcanza el 63 % de la respuesta final.
* **Zona muerta:** Rango de tensión en el que no se detecta movimiento.

**Recomendaciones:**

* Antes de cada ensayo, detener completamente el motor.
* Aplicar los escalones con un intervalo de reposo de al menos 3 s.
* Realizar varios ensayos por escalón para promediar resultados.

**Resultados esperados:**

* La respuesta aproximada es la de un sistema de primer orden.
* La corriente inicial es notablemente superior a la corriente estable.

1.- Variando en incrementos de 2 voltios la tensión continua aplicada al sistema (ver nota abajo) desde el mínimo hasta el máximo admisible (-12...+12), cumplimentar los datos de la tabla:

Diagrama

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Representación durante la simulación. Elaboración propia.

Gráfico, Histograma

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Tratamiento de datos al finalizar la simulación. Elaboración propia.

Tabla : Valores de corriente y velocidad para cada valor de tensión.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tensión (V) | Wm  (rpm) | Imed  (mA) |
| -12 | -165,056 | -64,3712 |
| -10 | -137,289 | -46,8864 |
| -8 | -119,55 | -39,8209 |
| -6 | -91,8955 | -27,0248 |
| -4 | -49,0629 | -23,0525 |
| -2 | 0 | -11,0379 |
| 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 11,31461 |
| 4 | 50,82861 | 23,44322 |
| 6 | 91,33266 | 31,06227 |
| 8 | 117,5951 | 38,87668 |
| 10 | 134,7282 | 48,90517 |
| 12 | 160,4278 | 76,06837 |

Interfaz de usuario gráfica, Texto, Aplicación

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Código para representación gráfica. Elaboración propia.

Gráfico, Gráfico de líneas

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Tensión (V) frente a velocidad (rpm). Elaboración propia.

Gráfico, Gráfico de líneas

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Tensión (V) frente a corriente (mA). Elaboración propia.

Como se puede observar, el motor de corriente continua presenta una zona muerta bastante grande, abarcando valores desde los -2V hasta los 2V. Esto es debido a las pérdidas que se producen en el puente H, donde la tensión aplicada no es exactamente la real del motor, y problemas de linealidad con el establecimiento de la tensión. Esto último se debe a la no linealidad de la tensión con la velocidad (al emplear la función map() en el código). Es posible que al aplicar la tensión directamente al motor, la zona muerta real sea ligeramente menor.

2.- Indicar el procedimiento para calcular Km (constante del par motor) y hallar el valor correspondiente. Para ello ténganse en cuenta los datos de los apartados 1 y 2, y calcule la columna Km de la tabla 3 (ATENCIÓN es necesario eliminar en los cálculos la corriente circulante en ausencia de movimiento, es decir la “corriente de offset”).

Es necesario convertir los valores a unidades del sistema internacional. La corriente en amperios (A) y la velocidad en rad/s (multiplicar a los rpm por 2π/60). Además, se debe extraer la corriente de offset (zona muerta) que consume el motor sin movimiento. También se debe multiplicar por la relación de transmisión para obtener la velocidad a la salida del eje antes de pasar por la reductora.

Tabla : Cálculo de la ganancia K\_m.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **V\_m (V)** | **m (rpm)** | **m salida (rad/s)** | **m motor sin recuctora (rad/s)** | **I\_m (mA)** | **Offset (mA)** | **I\_corregida (A)** | **K\_m (N·m/A)** |
| -12 | -165.056 | -17.284 | -587.66 | -64.37 | -11.0 | -0.05337 | 0,6868 |
| -10 | -137.289 | -14.383 | -489.01 | -46.89 | -11.0 | -0.03589 | 0,6892 |
| -8 | -119.55 | -12.522 | -425.74 | -39.82 | -11.0 | -0.02882 | 0,6333 |
| -6 | -91.8955 | -9.622 | -327.15 | -27.02 | -11.0 | -0.01602 | 0,6195 |
| -4 | -49.0629 | -5.139 | -174.72 | -23.05 | -11.0 | -0.01205 | 0,7726 |
| -2 | 0 | 0 | 0 | -11,0379 | ZM | — | - |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ZM | — | - |
| +2 | 0 | 0 | 0 | 11,31461 | ZM | — | - |
| +4 | 5.322 | 5.322 | 181.0 | 23.44 | +11.3 | +0.01214 | 0,7460 |
| +6 | 9.568 | 9.568 | 325.3 | 31.06 | +11.3 | +0.01976 | 0,6220 |
| +8 | 12.310 | 12.310 | 418.5 | 38.88 | +11.3 | +0.02758 | 0,6444 |
| +10 | 14.110 | 14.110 | 479.7 | 48.91 | +11.3 | +0.03761 | 0,7022 |
| +12 | 16.789 | 16.789 | 570.8 | 76.07 | +11.3 | +0.06477 | 0,7054 |

El valor medio experimental de Km es de 0,710 N·m/A. Este valor corresponde a una velocidad en rad/s de la reductora. Para determinar el valor exacto de Km en el eje del motor, es necesario dividir por la relación de transmisión:

3-. En el datasheet Km= 0,0209. Comparar con el valor obtenido. Justificar las posibles diferencias.

El valor experimental muestra una alta concordancia con el valor teórico, presentando una diferencia aproximada del 1% por debajo de este. Se considera un resultado prácticamente coincidente. Cabe señalar que algunos parámetros de la ficha técnica del motor se han ajustado ligeramente, dado que no estaban especificados de forma detallada para la versión con reductora 1:34.

1. **CONTROL DE VELOCIDAD**

En esta práctica se procederá al diseño de un controlador proporcional-integral (PI) cuyo objetivo es obtener una respuesta del sistema conforme a unas especificaciones dinámicas previamente definidas. Una de las tareas esenciales de este diseño consiste en identificar las principales limitaciones del modelo dinámico y valorar el rendimiento realista que puede alcanzarse en la implementación.

El controlador diseñado será posteriormente validado experimentalmente durante la práctica de laboratorio, comprobando que el comportamiento de la planta controlada se aproxima al previsto por el modelo matemático. La actividad consistirá en utilizar la función de transferencia de la planta para determinar los parámetros del regulador PI de modo que el sistema en lazo cerrado presente una respuesta sin sobresalto (subamortiguada) y una frecuencia natural no amortiguada especificada de ωn =35 rad/s.

**Diagrama

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.**

Figura : Control de velocidad con controlador PI. Elaboración propia.

Se recuerda que ωn es un parámetro que caracteriza la respuesta de un sistema de segundo orden, junto con el coeficiente de amortiguamiento delta. La relación entre estos dos parámetros está dada por:

Y por la expresión general de segundo orden:

La expresión del controlador es la siguiente:

Al combinar ambas ecuaciones, se obtiene la expresión del sistema en lazo cerrado (con ):

Para determinar el valor de los parámetros proporcional e integral, se identifican los valores de la ecuación de segundo orden:

Al reordenar ambas expresiones, se obtienen los siguientes parámetros del controlador. Empleando un factor de amortiguamiento δ = 1 y ωn = 35 rad/s:

Interfaz de usuario gráfica, Diagrama

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Figura : Lazo cerrado del sistema con control PI. Elaboración propia.

Por otro lado, es necesario calcular el par externo que reduce un 40% la velocidad del motor. Con este par, es posible simular una carga en el motor y verificar si el controlador PI funciona correctamente.