

Diseño de un Módulo de Laboratorio de Bajo Costo para la Asignatura Control de Sistemas
Eléctricos

Frahunter Leonardo Villamizar Flechas

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

Ricardo Alzate Castaño

Doctorado en Ingeniería Informática y Automática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Contenido

Introducción	9
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Concepción del Banco de Laboratorio.....	15
2.1 Idea General del Sistema	15
2.2 Elección de componentes de potencia	16
2.2.1 Motor de corriente continua.....	16
2.2.2 Driver de motor	18
2.3 Elección de dispositivo de sensado.....	18
2.4 Elección dispositivos de proceso de señal	21
2.4.1 Procesamiento analógico de datos	21
2.4.2 Procesamiento Digital de Datos.....	22
2.4.2 Procesamiento Digital de Datos.....	22
2.5 Interfaz de usuario.....	23
2.6 Esquema final para diseño del prototipo de laboratorio	27
3. Simulación de los lazos de control.....	31

3.1 Equivalente circuital para las partes electromecánicas del sistema	31
3.2 Escenarios de análisis para los lazos de control.....	35
4. Conclusiones	45
4.1 Recomendaciones	47
Referencias Bibliograficas	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Módulo de entrenamiento para control de motores desarrollado en Univalle.....	12
Figura 2. Estructura del prototipo de banco de laboratorio	17
Figura 3. Dispositivos comerciales seleccionados para prototipo de laboratorio.....	19
Figura 4. Modelo en tres dimensiones para acople mecánico del sistema.....	20
Figura 5. Definición de zonas para secuencia de acciones en interfaz de usuario.....	25
Figura 6. Distribución de elementos para interfaz de usuario	26
Figura 7. Diagrama de operación del sistema.....	29
Figura 8. Esquema final para prototipo.....	30
Figura 9. Montaje experimental realizado para caracterizar la operación del dinamo.	33
Figura 10. Relación entre velocidad de motor y voltaje generado en dinamo ante diferentes posiciones de la relación de transmisión.....	34
Figura 11. Equivalente circuital para la planta	35
Figura 12. Funciones de transferencia estáticas para equivalente circuital del conjunto driver motor-dinamo.....	36
Figura 13. Acción de control proporcional en lazo abierto ante diferentes valores de ganancia .	37
Figura 14. Acción de control proporcional en lazo cerrado ante diferentes valores de ganancia.	40
Figura 15. Acción de control integral en lazo abierto para $k_i = 1$	41
Figura 16. Acción de control integral en lazo cerrado ante diferentes valores de ganancia.....	41
Figura 17. Acción de control PI en lazo cerrado ante diferentes valores de ganancias	43

Figura 18. Respuesta de controladores ante estímulo de error para realización compacta (módulos MultiSim 44

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Listado de elementos utilizados en prototipo	27

Resumen

Título: Diseño de un Módulo de Laboratorio de Bajo Costo para la Asignatura Control de Sistemas Eléctricos*

Autor: Frahunter Leonardo Villamizar Flechas**

Palabras Clave: Control Experimental, Diseño de Bajo Costo, Prototipo de Laboratorio, Servomecanismo.

Descripción:

El presente trabajo de grado aborda el diseño de un prototipo de bajo costo para el desarrollo de actividades de laboratorio en la asignatura Control de Sistemas Eléctricos del Programa de Pregrado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Inicialmente, se concibe un servomecanismo constituido por el control de velocidad para un motor de corriente continua, censado analógicamente mediante un dinamo, acoplado a una caja reductora de bicicleta en su eje de rotación a manera de mecanismo de perturbación. El procesamiento de las señales del lazo de control se diseña a través de un esquema híbrido que incorpora acciones básicas de control proporcional, integral y combinado (PI) empleando realizaciones circuitales con amplificadores operacionales y también mediante la programación de algoritmos en un microprocesador de bajo costo. La distribución espacial de elementos en el prototipo de laboratorio se realiza atendiendo a criterios de diseño aplicados en el ámbito industrial para la concepción de interfaces de usuario. La apropiada operación de los circuitos diseñados fue verificada a partir de simulaciones en el entorno MultiSim de National Instruments. Trabajo complementario al presente proyecto incluye la implementación física del prototipo de laboratorio y la articulación de su uso en las actividades prácticas de la asignatura para la cual fue concebido.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Director: Ricardo Alzate Castaño. Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

Abstract

Title: Design of a Low-Cost Laboratory Prototype for the Electrical Systems Control Course*

Author: Frahunter Leonardo Villamizar Flechas**

Keywords: Experimental Control, Laboratory Prototype, Low-Cost Design, Servomechanism.

Description:

This work addresses the design of a low-cost laboratory prototype for development of practical activities of the Electrical Systems Control course at the Bachelor Degree Program on Electrical Engineering of the Universidad Industrial de Santander. First of all, a servomechanism composed of a speed regulation-loop for an electrical DC motor was considered as the case of study, being sensed by an electric dynamo coupled to its rotation axis through a gear-box, acting as the mechanical disturbance. The processing of signals for the control loop was achieved by a hybrid scheme consisting on realizations for basic control actions of the proportional, integral and combined (PI) types, performed by analog circuits based on operational amplifiers as well as digital implementations by coding algorithms on a low-cost microprocessor. The spatial distribution for the elements of the experimental prototype was performed following the guidelines for designing user interfaces at the industry level. On the other hand, the proper operation of the circuits involving control loops was tested by numerical simulations executed on the MultiSim package of National Instruments. Ongoing and complementary work include the physical implementation of the experimental prototype and its use within the practical activities of the course for which it was conceived.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Director: Ricardo Alzate Castaño. Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

Introducción

“La práctica hace al maestro”, una frase con autor desconocido, pero de suma popularidad y relevancia en la sociedad, inspiradora de profundas investigaciones y desarrollos científicos en materia de aprendizaje, las cuales concluyen que el uso de un modelo de aprendizaje práctico y no solo teórico propicia una articulación más profunda en el alumnado a lo largo de su formación universitaria (Angels, 2009). Es así como la creación de espacios orientados a desarrollar competencias prácticas se torna de gran relevancia en la formación de habilidades en áreas técnicas. Sin embargo, la creación de estos espacios se ve empañada por una realidad poco alentadora en universidades públicas, debido al desfinanciamiento que paulatina y progresivamente ha invadido al sistema educativo (Noreña, 2012). En contraste, es notoria la inversión en laboratorios de investigación, aunque motivada por razones monetarias y amparándose en tasas de retorno a través de la venta de servicios o generación de productos comercializables. Un ejemplo de esta infraestructura a nivel colombiano es el Parque Tecnológico Guatiguará en la Universidad Industrial de Santander, considerado el más avanzado dentro de la política de parques tecnológicos establecida por el gobierno nacional (Angulo, 2012). Dichos espacios, sin embargo, no son destinados del todo a prácticas de estudiantes de programas de pregrado, lo cual sumado a una infraestructura obsoleta de laboratorios de formación de base y/o en condiciones de funcionamiento precarias, no supe de manera apropiada competencias a nivel experimental que complementen conocimientos teóricos adquiridos en las aulas de clase.

En el caso particular de los programas de ingeniería de la Universidad Industrial de Santander y, más precisamente, en la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de

Telecomunicaciones (E3T), se cuenta con una infraestructura para prácticas en laboratorios de máquinas eléctricas y accionamientos eléctricos que data de los años 80 (Suarez, Mateus, Escamilla, Rojas, & Enciso, 2013). Algunos esfuerzos aislados se han realizado para abordar el control de máquinas eléctricas en laboratorio como estrategia para suplir la carencia de estos sistemas como se documenta en (Muñoz, Sarmiento, & Guarín, 2013), (Contreras & Sánchez, 2010), (Barrera & Pérez, 2009), (Tasco & Rojas, 2013), (Suarez & Duarte, 2016). En la actualidad, cuando un estudiante del programa de ingeniería eléctrica se enfrenta a la tarea de analizar la estabilidad de un sistema eléctrico en un lazo de control automático (conforme requerido en el plan de estudios), no se dispone de sistemas dotados para tal propósito. En particular, la E3T-UIS posee un módulo 33-110 desarrollado por Feedback Instruments (Feedback, 2000), el cual propone prácticas para el control de velocidad de un motor DC, mismo que presenta evidencias de desgaste por el prolongado tiempo de uso y que además no es actualmente comercializado. Opciones comerciales similares incluyen los módulos Feedback Instruments 60-070, 70-005 (Feedback, 2000) y AMATROL T5552, T5553, T5554, T5555 (Amatrol, 2017). Sin embargo, la realidad reciente muestra que no existen recursos para desarrollar prácticas en esta área del conocimiento que, además, soporta grupos cercanos al centenar de estudiantes.

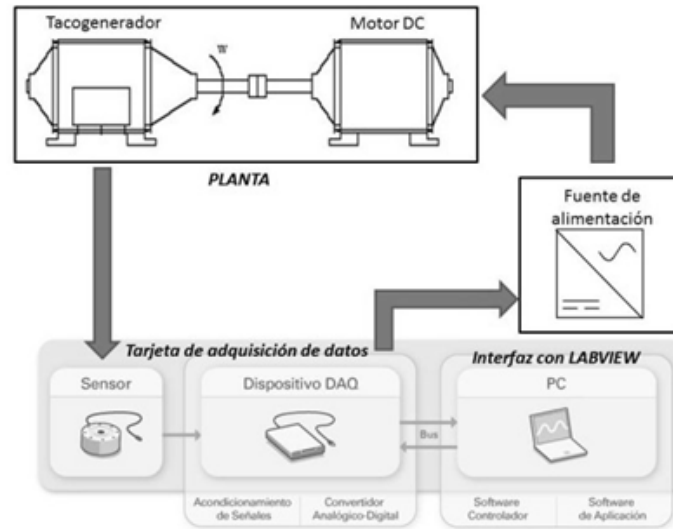
La situación mencionada con anterioridad no es una realidad exclusiva de la Universidad Industrial de Santander y por tanto, se han propuesto por ejemplo, soluciones como: (Muñoz & Salgado, 2016), en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá D.C., donde se diseñaron y construyeron 4 prototipos de un banco didáctico de pruebas para sensores de proximidad del laboratorio de tecnología de electricidad y (Páez, 2014), realizado en la Corporación Universitaria UNITEC, donde se pudo desarrollar un módulo de pruebas para prácticas de laboratorio en electrónica analógica y digital. Asimismo, en la Universidad Industrial

de Santander se destacan trabajos como: (Arias & Rangel, 2013), en el cual se reutilizaron elementos disponibles para desarrollar un banco de pruebas para el arranque y frenado de motores de inducción y de corriente continua de excitación independiente mediante PLC y (Centeno, 2014) donde se diseñó un banco de laboratorio para el control y análisis de un sistema térmico en los laboratorios del programa de ingeniería mecánica UIS. Estos desarrollos muestran que es posible emplear el ingenio y la capacidad de creación de los profesionales colombianos para adaptar tecnología de bajo costo a los procesos formativos de competencias técnicas en el ámbito universitario.

En este contexto, quizás el trabajo más relevante se referencia en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle (Franco, Posada, & Ramírez, 2008), (Plazas & Ramírez, 2012), dando como resultado un banco de pruebas para motores de inducción en docencia e investigación, con correspondientes prácticas de laboratorio orientadas a: reconocer los componentes de un lazo de control, modelar sistemas dinámicos de primer y segundo orden, validar su respuesta en el tiempo, identificar zonas de operación y realizar estudios de estabilidad para diferentes valores de ganancia mediante la respuesta en frecuencia.

Figura 1.

Módulo de entrenamiento para control de motores desarrollado en Univalle



De esta manera, el presente trabajo de grado concibe el diseño de un sistema eléctrico sencillo y de bajo costo, como caso de estudio de la dinámica de un sistema de control, verificable experimentalmente en laboratorio, para ser posteriormente construido y replicado como estrategia facilitadora de acceso a experiencias prácticas sobre este tipo de fenómenos, en estudiantes de los programas de pregrado de la E3T-UIS.

Los sistemas eléctricos actuales se ven sometidos a innumerables tipos de perturbación debidas principalmente a la conexión y desconexión de cargas o a la entrada y salida de generadores en sistemas distribuidos. Dichos fenómenos pueden ser estudiados a una escala menor, considerando una maquina operando como motor y sometida a perturbaciones de torque en un esquema de lazo cerrado.

Así entonces, reviste fundamental importancia propiciar en el estudiante de ingeniería experiencias de laboratorio que le permitan conocer e identificar experimentalmente fenómenos asociados con el comportamiento dinámico y la estabilidad de los sistemas eléctricos.

Sin embargo, constituir un laboratorio para verificar experimentalmente fenómenos dinámicos en sistemas eléctricos representa un alto costo de inversión principalmente por los niveles de potencia generados en los picos de comportamientos transitorios, adicional al desgaste mecánico (motriz y de accionamiento) empleado para crear los efectos de perturbación.

Por tanto, alrededor de esta temática pueden plantearse las siguientes inquietudes: ¿Es posible constituir un prototipo de bajo costo que permita verificar en laboratorio fenómenos dinámicos en sistemas eléctricos? ¿Es posible replicar dicho prototipo en un número de unidades suficientes para satisfacer la demanda de los grupos de laboratorio en la E3T-UIS?

¿Puede a partir de este prototipo estudiarse un problema a escala, del control de sistemas eléctricos a nivel industrial?

El presente trabajo de grado orienta sus esfuerzos a responder estas inquietudes, buscando proveer insumos para el fortalecimiento de la línea de investigación en operación, control e instalación de sistemas de energía eléctrica del grupo de investigación GISEL de la E3T-UIS.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un prototipo de bajo costo a partir de elementos comerciales disponibles en el mercado local, para ser empleado en prácticas de la asignatura Control de Sistemas Eléctricos del Programa de Ingeniería Eléctrica de la E3T-UIS.

1.2 Objetivos Específicos

Definir las características para un banco de laboratorio que permita verificar el comportamiento dinámico de un sistema eléctrico.

Dimensionar y seleccionar elementos comerciales para la etapa de potencia del sistema.

Diseñar y simular los circuitos de baja potencia y de proceso de señal del sistema.

Diseñar la distribución espacial para los diferentes elementos en el prototipo de laboratorio.

2. Concepción del Banco de Laboratorio

El presente Capítulo aborda las ideas generales sobre las cuales se plantea el diseño de un prototipo de banco de laboratorio para realizar la componente experimental de la asignatura Control de Sistemas Eléctricos, en el programa de pregrado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander.

Inicialmente se realiza una justificación global para el prototipo, seguido de una explicación de la selección de los elementos a utilizar, que posteriormente se complementarán por pruebas de simulación en un Capítulo siguiente.

2.1 Idea General del Sistema

Tomando como base el prototipo de pruebas Feedback Instruments 33-110 (Feedback, 2000), se plantea la construcción de un banco de laboratorio basado en un servomecanismo para verificar los fundamentos teóricos del control clásico.

Fundamentalmente, se selecciona este tipo de sistema por su simplicidad de operación, su bajo costo, su reducida necesidad de espacio y la posibilidad de replicación a partir de elementos de fácil consecución en el mercado local. Asimismo, el estudio de esta clase particular de sistema (servomecanismo basado en un motor de corriente continua) constituye una parte integral del tema de la asignatura Control de Sistemas Eléctricos y por tanto, la construcción de una versión experimental complementa y profundiza el entendimiento de su comportamiento dinámico, como estrategia didáctica para alcanzar los objetivos pedagógicos. De hecho, el proyecto de laboratorio

de la asignatura durante semestres previos a la concepción del presente trabajo de grado, ha consistido en el desarrollo del control para dicho servomecanismo a través de simulaciones en el entorno SimScape de MATLAB.

Por tanto, tal y como se muestra en el diagrama de bloques de la Fig. 2.1, el sistema estaría constituido de un motor con su correspondiente sensor de velocidad, un circuito de potencia (driver de motor) que facilite aplicar los niveles de alimentación para la operación apropiada del mecanismo, una fuente de poder, un elemento que proporcione la perturbación para el sistema y elementos de proceso de información (analógicos y digitales) para ejecutar acciones básicas de control (Proporcional + Integral). Todo lo anterior deberá estar complementado con una interfaz para la interacción entre el usuario y sistema de entrenamiento.

2.2 Elección de componentes de potencia

Posterior a la concepción general para el prototipo de laboratorio, se realiza la selección para elementos comerciales que permitan constituir la componente de potencia (mecánica y eléctrica) del sistema.

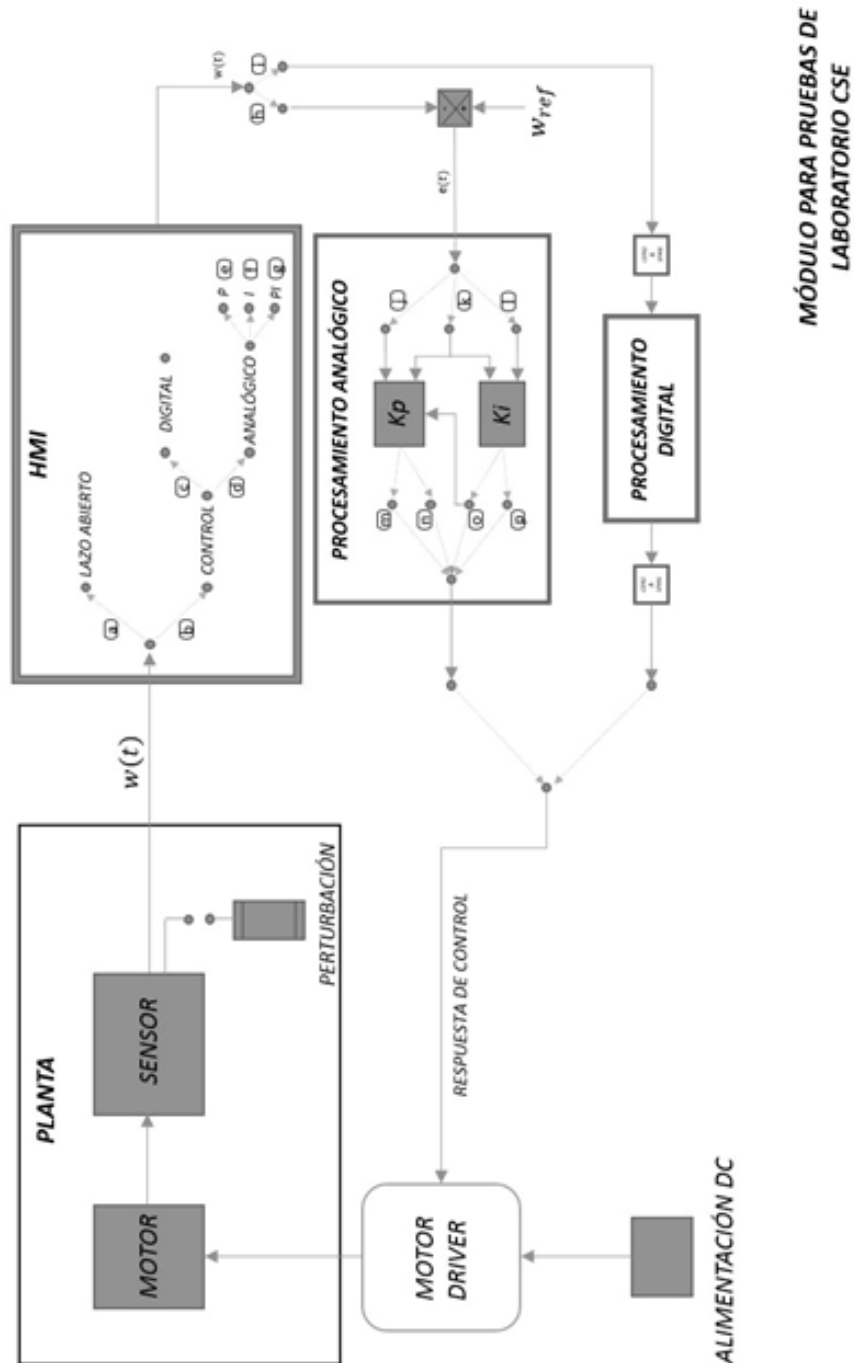
De esta manera se establecen criterios para determinar los dispositivos a ser empleados en el servomecanismo según presentado a continuación.

2.2.1 Motor de corriente continua

El primer elemento seleccionado corresponde con un motor de corriente continua de 250 W a 24 VDC, como el ilustrado en la Fig. 2.2(a). Este tipo de motores es empleado en aplicaciones de movilidad, particularmente en bicicletas eléctricas, lo cual facilita su disponibilidad comercial. El costo aproximado del dispositivo en el mercado es de \$350.000 COP.

Figura 2.

Estructura del prototipo de banco de laboratorio



Otras características importantes del motor seleccionado, incluyen una velocidad nominal de 2650 RPM y un acoplamiento mecánico de rotor de 11 dientes para cadena N → 25.

2.2.2 Driver de motor

Como dispositivo para variar la alimentación del motor, se seleccionó una tarjeta distribuida por la empresa Cacahuete Ingeniería (ver Fig. 2.2(b)) que permite entregar hasta 960 W a 24 VDC (equivalentes a una corriente máxima de 40 A), empleando modulación de ancho de pulso para modificar el ciclo útil de operación. El costo aproximado del dispositivo en el mercado es de \$100.000 COP, siendo de fácil reemplazo con opciones genéricas disponibles en el mercado local.

2.2.3 Fuente de poder

Como fuente de alimentación principal se seleccionó el dispositivo ilustrado en la Fig.3 (c), distribuido por la empresa Grupo Maroel y Compañía S.A.S y con características eléctricas dadas por: 1) Alimentación de entrada: 110/220 V \pm 15 %; 2) Tensión de salida:24 VDC / 20 A; 3) Potencia nominal: 480 W. El costo aproximado del dispositivo en el mercado es de \$175.000 COP.

2.3 Elección de dispositivo de sensado

La variable a controlar será la velocidad de rotación ω del motor de corriente continua. Por tanto, atendiendo a las características de bajo costo del prototipo de laboratorio, se optó por emplear un dinamo (tacogenerador) para producir una tensión analógica proporcional a ω .

El dispositivo comercial seleccionado se ilustra en la Fig. 2.2(d) y corresponde el modelo 8PC-12V6W de la marca DIAMOND, distribuido por la empresa BICICLETAS MILAN y con

características eléctricas dadas por una tensión entre 0 y 12 VDC, para una potencia máxima de 6 W. El costo aproximado del dispositivo en el mercado es de \$35.000 COP.

Figura 3.

Dispositivos comerciales seleccionados para prototipo de laboratorio



(a) Motor DC



(b) Driver de motor



(c) Fuente de poder



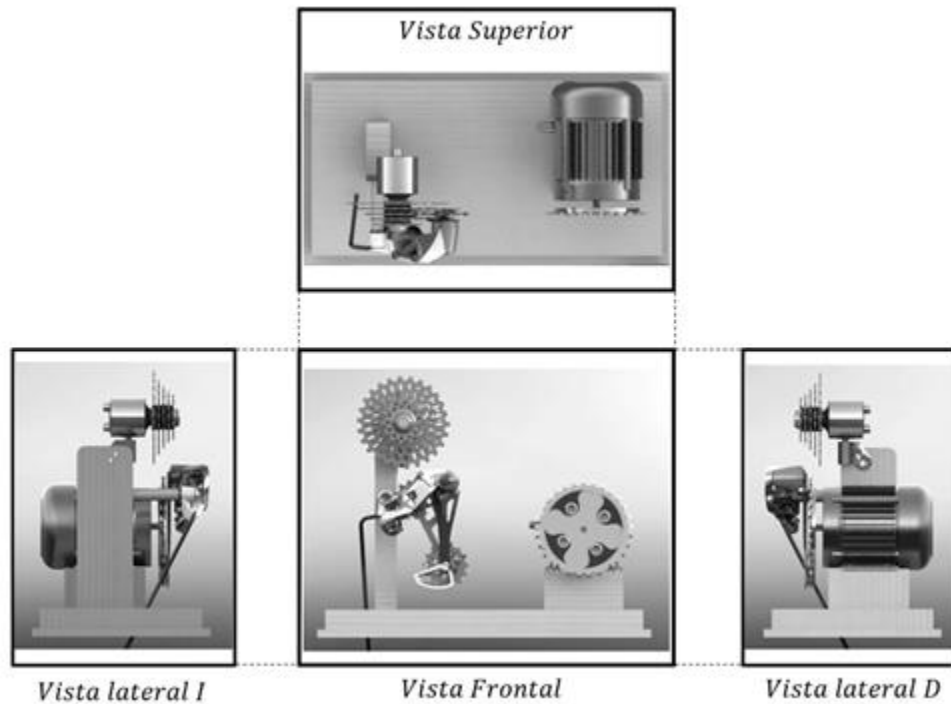
(d) Dinamo

Adicionalmente, se debe realizar el acople mecánico entre el eje de rotación de la máquina y el dinamo, tratando de conservar una relación de vueltas que permita maximizar el rango de valores sensados respecto a las velocidades posibles del motor. Para ello, se propone un arreglo de engranajes que facilite la selección de velocidades empleando como base la transmisión mecánica de una bicicleta.

De esta manera, la Fig. 4 presenta un esquema tridimensional que ilustra el acople mecánico propuesto entre el eje del motor, el arreglo de engranajes y el dinamo.

Figura 4.

Modelo en tres dimensiones para acople mecánico del sistema



Lo anterior representa a su vez una manera de introducir, mecánicamente, una perturbación en el sistema que altera la lectura de velocidad de rotación de la máquina. El costo comercial del arreglo de engranajes asciende a \$55.000 COP.

2.4 Elección dispositivos de proceso de señal

Como se observa de la Fig. 2 una parte importante del prototipo de laboratorio se compone del procesamiento (analógico y digital) de la información proveniente de los elementos de sensado (dinamo) y hacia los dispositivos de actuación (driver de motor), por parte del dispositivo de control.

2.4.1 Procesamiento analógico de datos

Inicialmente, se propone realizar un tratamiento analógico para el cálculo de una estrategia de control del tipo proporcional-integral (configurable a sus versiones individuales: P e I). Para ello se emplearán amplificadores operacionales empaquetados en circuitos integrados de referencia TL084ACN.

La configuración circuital para el esquema de procesamiento de datos se presenta en la Fig. 5 Para el caso analógico, los valores de parámetros circuitales fueron calculados en el modo siguiente:

Para la etapa correspondiente al error se configuro un amplificador sumador-restador empleando resistencias de valor fijo de $10\text{ k}\Omega/0.5\text{ W}$ para asignarle ganancia unitaria a los pesos de sus respectivas señales de entrada, una de ellas correspondiente con la salida de la etapa de acople de entrada y la otra siendo un nivel ajustable tensión DC en el rango $[0, 12]\text{ V}$ que representa el valor de referencia de velocidad deseada; los circuitos para las etapas de acople de entrada y acople de salida se basan en configuraciones del tipo seguidor de tensión; La etapa de acción proporcional se constituye de una entrada de base (nivel DC de 7.5 V) correspondiente al

valor nominal de entrada para operación de la planta (driver+ motor de corriente continua) al cual se suma la amplificación del error. Dicha configuración verifica el efecto proporcional puro sin comportamientos oscilatorios. A su vez, el sumador está constituido por una configuración de amplificador sumador-restador con resistencias de valor fijo de $10\text{ k}\Omega/0.5\text{ W}$ para asignarle ganancia unitaria a los pesos de sus respectivas señales de entrada. El factor de amplificación del error (k_p) se construye en una etapa de amplificación inversora mediante un potenciómetro de $100\text{ k}\Omega$ y una resistencia de valor fijo de $10\text{ k}\Omega/0.5\text{ W}$, que permiten suministrar un rango $k_p \in [0, 10]$; La etapa de acción integral, se construye sobre la base de un amplificador integrador-inversor con factor de amplificación (k_i) constituido a partir de un capacitor no polarizado (cerámico) de valor fijo de $10\text{ }\mu\text{F}$ y un potenciómetro de $100\text{ k}\Omega$, que permiten suministrar valores para el parámetro $k_i \geq 1$. Lo anterior se complementa por una etapa inversora de ganancia unitaria con resistencias de valor fijo de $10\text{ k}\Omega/0.5\text{ W}$; La alimentación de todos los amplificadores es dual y de valor $V_{CC} = \pm 18\text{ V DC}$. Tomando en cuenta que todo amplificador operacional se satura 1 V por debajo de su tensión de alimentación, lo anterior significa tensiones máximas del lazo de $\pm 17\text{ V DC}$.

A partir de lo anterior, se cuantifica la utilización de 7 amplificadores operacionales en el sistema, encapsulados en 2 circuitos integrados, con un valor comercial individual de \$2.500 COP.

2.4.2 Procesamiento Digital de Datos

Como segunda alternativa, se propone la implementación de algoritmos de control a través de programación en un microcontrolador ATmega328P incorporado en el sistema de desarrollo ARDUINO UNO. Para este propósito, se realiza el diagrama de conexiones mostrado en la Fig. 5

para que, a través de una interfaz, el usuario pueda seleccionar la manera de interactuar con el lazo de regulación de velocidad (i.e. el tipo de procesamiento de datos y control). El valor comercial de un sistema de desarrollo ARDUINO UNO asciende a la fecha a \$30.000 COP.

De otro lado, el acople de la señal medida al microcontrolador y del microcontrolador al actuador, se realizó empleando circuitos de Zero & Span implementados a partir de amplificadores operacionales constituyendo la ecuación de una línea recta para ajustar relaciones entre rangos de salida y entrada.

De esta manera, la Fig. 5 muestra los valores implementados en la etapa Zero & Span1 para los rangos de entrada [1, 12] V y de salida [0, 5] V, mientras que para la etapa Zero & Span 2 los rangos son [0, 5] V y [1, 15] V respectivamente. Es importante mencionar que los valores de resistencias no comerciales se ajustaran mediante potenciómetros de precisión tipo trimmer.

2.5 Interfaz de usuario

La operación del prototipo de laboratorio se realizará desde un panel o interfaz de usuario que contará con las siguientes opciones:

Un pulsador para aplicar la perturbación eléctrica al sistema. En este punto es importante aclarar que las perturbaciones aplicadas serán de dos tipos: eléctrico y mecánico. En el caso mecánico, corresponderá con el cambio de velocidad a partir de modificar la relación entre engranajes de una caja de velocidad de bicicleta. Por su parte la perturbación eléctrica se realizará con una alteración del voltaje medido por el elemento de sensado (dinamo);

Un indicador visual (led) que indique la presencia de la perturbación eléctrica; un conmutador mecánico para aplicar la perturbación mecánica al sistema; un indicador visual

(etiqueta) que indique la presencia de la perturbación mecánica; un potenciómetro para seleccionar el valor de la ganancia de control proporcional k_p ; una indicación visual para el valor de k_p ; un potenciómetro para seleccionar el valor de la ganancia de control integral k_i ; una indicación visual para el valor de k_i , selectores e indicadores para los parámetros k_p y k_i bajo el modo de operación digital; Un interruptor que permite seleccionar entre las siguientes opciones de control: P1) lazo abierto, P2) proporcional, P3) integral y P4) proporcional-integral. La relación entre las posiciones de control (P1-P4) y la nomenclatura de contactos (s1A-s2A- s3A-s4A-s5A-s6A-s7A-s8) definida para el circuito de la Fig. 2.4 (considerando para s1A-s7A: “1” contacto cerrado y “0” contacto abierto; y para s8: “0” posición original en diagrama y “1” posición cambiada) es la siguiente: P1 = 00000001; P2 = 10100100; P3 = 01001010; P4 = 11011100; Un indicador visual (led) que indique la posición del selector del tipo de control; Un selector para el tipo de procesamiento de datos, entre analógico y digital; Un indicador del tipo de procesamiento de datos; Una pantalla para indicación del tipo de control bajo el modo de procesamiento digital de datos; Indicación del valor de la velocidad del motor de corriente continua.

Para concebir la organización de dichos elementos en la interfaz, se siguieron las recomendaciones de diseño sugeridas por (Rodríguez, 2012), en las cuales se abordan los principios de diseño para una interfaz de alto rendimiento. Aun cuando la interfaz necesaria para el banco de laboratorio no supone alta complejidad, se tienen en cuenta conceptos básicos como el flujo de interacción, diseño y organización del despliegue, principios fundamentales en el diseño de este tipo de sistemas (Villota & Mosquera, 2006).

En particular, se asumió una secuencia de acciones de operación organizada de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, según se ilustra en el esquema de la Fig. 2.5. La primera acción se localiza en la Zona 1 y corresponde con la selección del tipo de procesamiento de datos, entre

analógico y digital (con sus respectivos indicadores de estado). Posteriormente, se ubica en la Zona 2 a los interruptores de selección para las acciones de control. Específicamente, en la Zona 2.a se disponen 4 interruptores (D1, D2, D3 y D4) para la selección de controladores en modo digital, mientras que en la Zona 2.b se incorpora un selector de 4 posiciones (P1, P2, P3 y P4) para su contraparte analógica (con sus respectivos indicadores de estado). Por su parte, en la Zona 3.a se aloja el visualizador del tipo de control bajo el modo de procesamiento digital de datos, siendo complementado en la Zona 3.b por los potenciómetros de ajuste para las ganancias proporcional k_p e integral k_i bajo el modo de operación analógico. Para el ajuste de dichos parámetros en el modo digital, se incorpora en la Zona 3.a un arreglo de 4 pulsadores. Finalmente, en la Zona 4 se disponen los elementos para aplicar las perturbaciones eléctrica y mecánica para alterar a voluntad la operación del sistema (con sus respectivos indicadores de estado).

La Fig. 6 muestra la distribución espacial para el diseño del panel de interacción con el usuario, realizado en SolidWorks.

Figura 5.

Definición de zonas para secuencia de acciones en interfaz de usuario

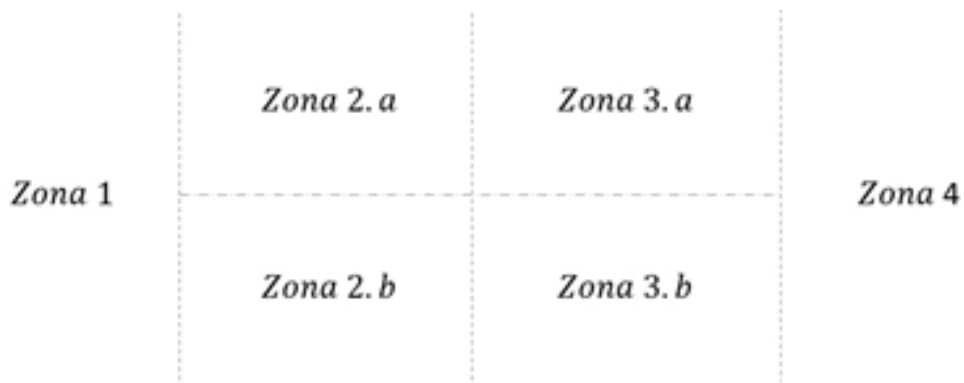
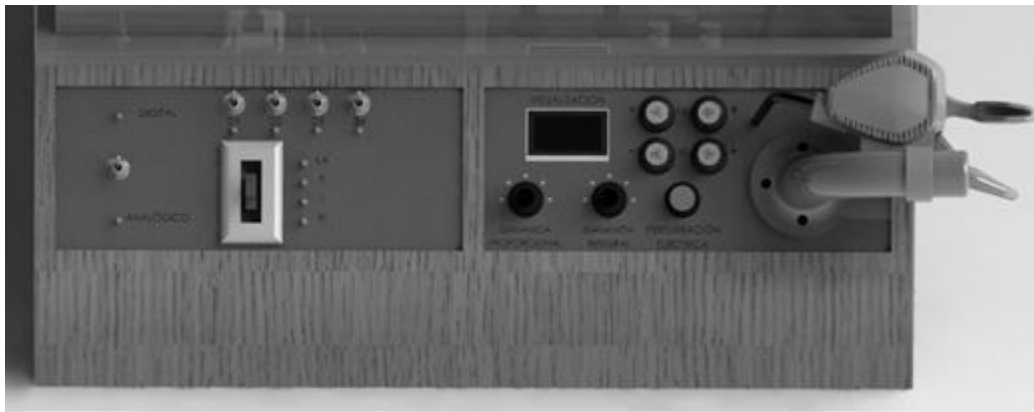


Figura 6.

Distribución de elementos para interfaz de usuario



Adicionalmente, la Fig. 2.7 muestra el diagrama que resume los estados de operación del sistema. Como se observa, el primer nivel de funcionamiento corresponde con la elección para el modo de procesamiento de información entre analógico (A) y digital (D). Si la selección es el caso analógico, el prototipo de laboratorio se encontrará en alguna de las cuatro configuraciones posibles: lazo abierto, control proporcional, control integral y control proporcional-integral. Para cualquiera de estas condiciones de operación será posible aplicar una perturbación en el sistema, que afectará el valor de sus variables (principalmente la medida). Asimismo, se observa que ante cada configuración el valor de señal aplicado al driver del motor DC por parte del circuito de control, adquiere una connotación particular. Ahora bien, bajo el modo de procesamiento digital, se pueden configurar los mismos tipos de control a través de las instrucciones D1-D4. La jerarquía de operación presentada en dicho diagrama es tomada en cuenta para definir el orden de las acciones incluidas en la interfaz de usuario presentada en la Fig. 2.6.

2.6 Esquema final para diseño del prototipo de laboratorio

Finalmente, se presenta en la Fig. 2.8 el esquema en tres dimensiones para la distribución espacial de los elementos que constituyen el prototipo de laboratorio, realizado en la herramienta de diseño asistido por computadora para sistemas mecánicos SolidWorks. Las proporciones de tamaño entre elementos del sistema se tomaron a partir de sus especificaciones técnicas. La distribución específica de los mismos se seleccionó con base en criterios similares a los presentados en la Sección 2.5, considerando para este caso rangos de visión para facilitar la interacción con el sistema, al igual que la altura a la cual se encuentran ubicadas sus partes. A partir de ello, será posible, por ejemplo, observar el movimiento del servomecanismo mientras se manipulan las opciones de control y perturbación en la interfaz de usuario. De otro lado, el mecanismo para realizar el cambio de relación de piñonera como perturbación mecánica del sistema, se ubica siguiendo las reglas de flujo de interacción y por tanto solo interviene cuando el usuario requiere introducir voluntariamente el cambio deseado de parámetros de operación. La cúpula en acrílico translucido fue incluida para brindar protección ante riesgos de manipulación en la zona del rotor.

Adicionalmente, la Tabla 2.1 incluye la lista de elementos y el costo aproximado del prototipo de laboratorio diseñado, a partir de lo cual es posible verificar el carácter de bajo costo del mismo.

Tabla 1.

Listado de elementos utilizados en prototipo

Cantidad	Elemento	Precio unitario COP	Precio total COP
2	Circuitos integrados TL084ACN	\$2.500	\$5.000
1	Diodo LED color verde	\$500	\$500
3	Diodos LED color azul	\$500	\$1.500
1	Diodos LED color rojo	\$500	\$500

Cantidad	Elemento	Precio unitario COP	Precio total COP
1	Selector múltiple de 4 posiciones	\$6.000	\$6.000
2	Bananas hembra	\$2.000	\$4.000
17	Resistencias de 10kΩ	\$400	\$6.800
1	Potenciómetro de 100kΩ	\$2.000	\$2.000
1	Trimmer de 100kΩ	\$5.000	\$5.000
1	Capacitor cerámico de 10 μF	\$10.000	\$10.000
1	Tarjeta driver para motor DC	\$100.000	\$100.000
1	Motor DC 24 V	\$350.000	\$350.000
1	Fuente DC 24 V	\$175.000	\$175.000
1	Dinamo de bicicleta	\$35.000	\$35.000
1	Juego de piñonería y tensor de bicicleta	\$55.000	\$55.000
1	Cadena de bicicleta paso N*25	\$6.000	\$6.000
1	Elaboración de tarjetas impresas PCB	\$50.000	\$50.000
1	Elaboración de soportes y carcazas	\$65.000	\$65.000
2	Conectores ribbon 2x21 canales	\$2.000	\$4.000
1	Metro de cable ribbon x 21 hilos	\$3.000	\$3.000
1	Sistema de desarrollo ARDUINO UNO	\$30.000	\$30.000
1	Pantalla LCD OLED para ARDUINO	\$20.000	\$20.000
1	Resistencias de 390kΩ	\$400	\$400
1	Resistencias de 22kΩ	\$400	\$400
1	Resistencias de 6.8kΩ	\$400	\$400
1	Resistencias de 180kΩ	\$400	\$400
1	Resistencias de 3.3kΩ	\$400	\$400
1	Resistencias de 2.2kΩ	\$400	\$400
2	Resistencias de 5kΩ	\$400	\$800
1	Trimmer de 10kΩ	\$3.000	\$3.000
2	Trimmer de 1kΩ	\$3.000	\$6.000
4	Pulsadores NA	\$200	\$800
	TOTAL		\$947.300

Figura 7.

Diagrama de operación del sistema

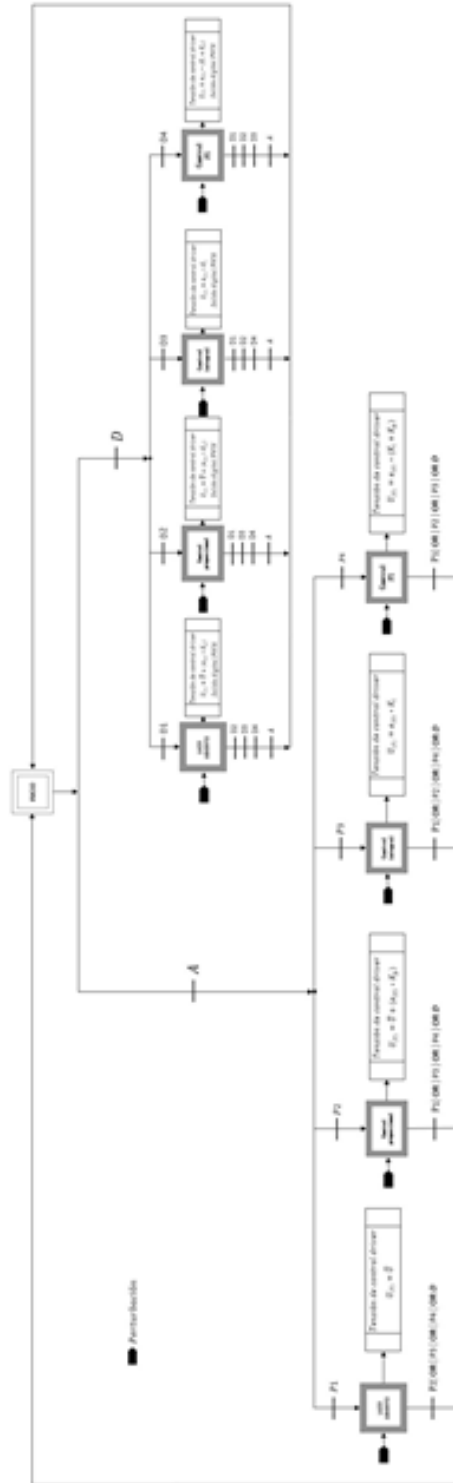


Figura 8.

Esquema final para prototipo



(a) Vista lateral explosionada



(b) Vista de solido tridimensional

3. Simulación de los lazos de control

Utilizando como base los parámetros circuitales para el prototipo de laboratorio diseñado en el Capítulo anterior, se realizará a continuación una verificación del desempeño del sistema a partir de experimentos de simulación numérica desarrollados en el paquete de simulación para circuitos electrónicos: MultiSim, de National Instruments.

Para este propósito y, en favor de obtener resultados consistentes con la realidad del prototipo, se deben desarrollar equivalentes circuitales para las partes electromecánicas del sistema real, así como también se deben definir los rangos para las variables del lazo de control en términos de sus valores experimentales.

3.1 Equivalente circuital para las partes electromecánicas del sistema

El sistema electromecánico del banco de laboratorio se concibe mediante el acople entre un motor DC con su respectivo circuito de accionamiento y un sensor (dinamo).

El modelado circuital para este sistema (planta) se inicia con el circuito de accionamiento o driver de motor, el cual se aproxima por medio de una fuente controlada de voltaje en corriente continua, con rango de entrada de 0-12 V y salida de 0-24 V. Para este caso el voltaje de entrada es el proporcionado por la señal de control, que como se definió en el Capítulo anterior, es la señal de salida de un amplificador operacional alimentado a ± 18 V DC.

Sin embargo, a pesar que el rango posible de valores en la señal de control (salida del amplificador operacional) es ± 17 V DC, existe una restricción en los valores de entrada de la tarjeta

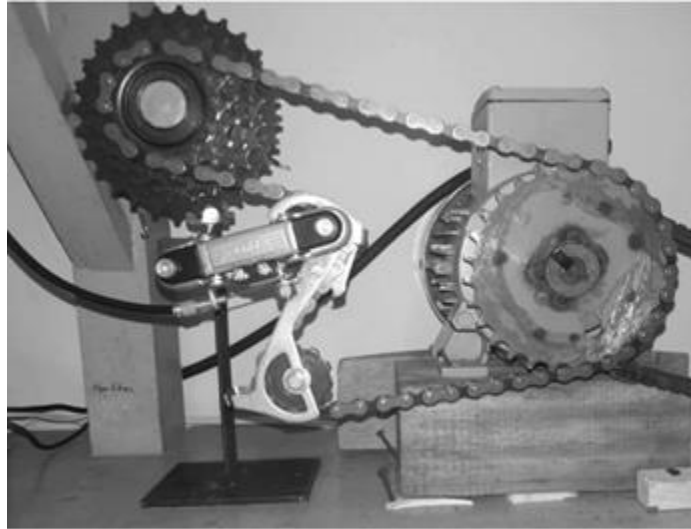
del driver de motor que se limita a 0-12 V DC. Esto se determinó mediante pruebas experimentales y por tanto deberá ajustarse el punto de operación nominal del sistema para caer al interior de este rango. En caso contrario, se presentarán fenómenos de saturación que precisamente se modelan de manera apropiada por la fuente controlada de voltaje y sus correspondientes rangos de salida, que coinciden con los valores esperados para la alimentación del motor de corriente continua según las especificaciones del circuito de accionamiento (driver).

Más aún, el motor de corriente continua se modela a partir del bloque DC MACHINE PERMANENT MAGNET disponible como parte de las herramientas del paquete de simulación para circuitos electrónicos MultiSim de National Instruments. Los parámetros configurados para el motor fueron: 0.1 mH en la inductancia del inducido; 0.2 Ω en la resistencia del inducido; 0.03 Vs/rad para la constante de velocidad; 0.003 Nm/A para la constante de torque; 0.0001 kg \times m² para la inercia del eje y 1×10^{-20} Nms/rad para su constante de fricción. De estos parámetros la inductancia y resistencia del inducido corresponden con datos proporcionados por el fabricante del motor seleccionado para el diseño. Los restantes parámetros son los valores configurados por defecto en el bloque de simulación.

Ahora bien, en cuanto respecta al modelado del elemento de sensado o dinamo, se realizó una caracterización experimental en laboratorio para conocer la relación entre las RPM en su entrada y la tensión en corriente continua generada en sus terminales de salida, ante la presencia de variaciones en la relación de transmisión dada por una caja de velocidades de bicicleta (como la considerada para aplicar la componente de perturbación mecánica del sistema). El montaje realizado en laboratorio se muestra en la Fig. 3.1, en donde se empleó como motor una máquina de inducción trifásica SIEMENS (jaula de ardilla) de 0.4 HP, accionada a través de un variador de frecuencia SINAMICS G110.

Figura 9.

Montaje experimental realizado para caracterizar la operación del dinamo.



A partir de ello, se obtuvieron los resultados ilustrados en la Fig. 3.2 de los cuales se verifica (en el eje vertical) que el piñón 3 es el que mejor se adecua al rango de entrada del driver de motor y, por tanto, en la búsqueda por alcanzar una relación 1:1 entre la entrada y la salida del sistema, se selecciona a esta como la condición nominal de operación en términos de la caja de velocidades. Por tanto, cualquier perturbación mecánica se considerará como una alteración sobre dicho valor.

De esta manera el elemento de sensado se puede representar mediante una fuente controlada de voltaje en corriente continua con rango de salida de 1-12 V.

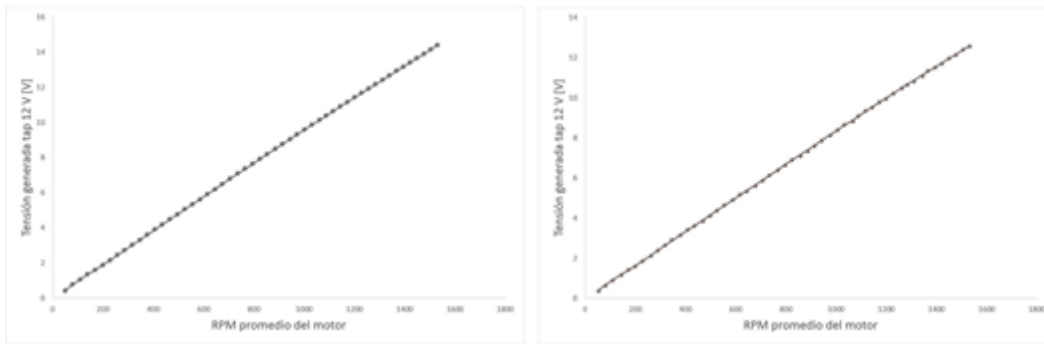
El conjunto driver-motor dinamo se ilustra a partir del equivalente circuital mostrado en la Fig. 3.3. Como se observa, la fuente controlada que representa el driver se acopla a la alimentación del motor de corriente continua.

Asimismo, el acople entre el motor y la fuente controlada que representa el dinamo se realiza a través de la tensión del inducido E_a y no precisamente a través de la salida en RPM del rotor. Lo anterior, debido al factor de incertidumbre entre las RPM de la prueba experimental y las

RPM del motor simulado, que a través de una relación de voltaje con pendiente cercana a 0.43 V/V permitió emular apropiadamente la acción del sensor de velocidad.

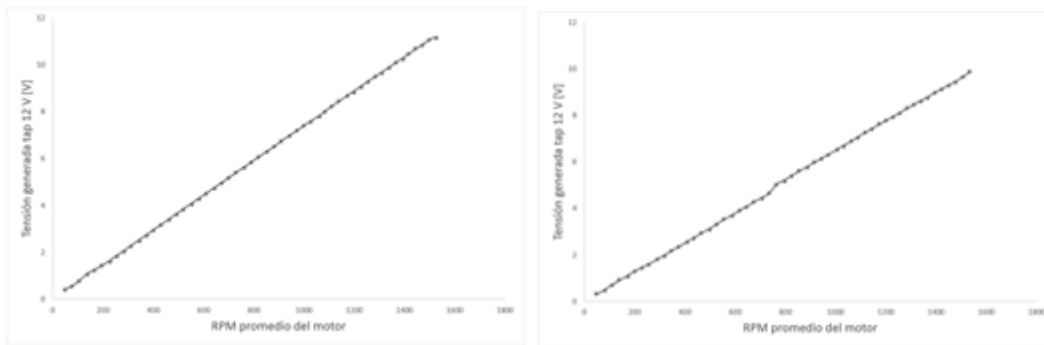
Figura 10.

Relación entre velocidad de motor y voltaje generado en dinamo ante diferentes posiciones de la relación de transmisión



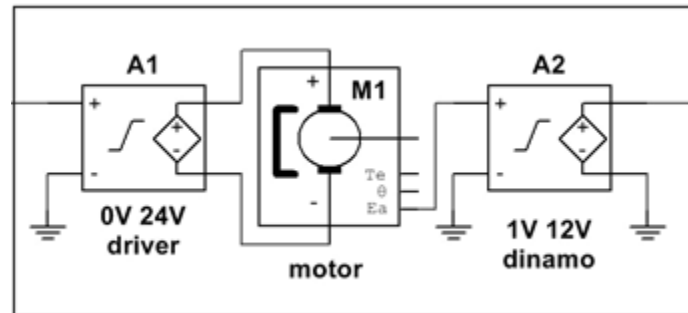
(a) piñón 1

(b) piñón 2



(c) piñón 3

(d) piñón 4

Figura 11.*Equivalente circuital para la planta*

Como resultado, la Fig. 3.4 muestra las relaciones de ganancia (funciones de transferencia estáticas) para las fuentes controladas que representan al driver (Fig. 3.4(a)) y al dinamo (Fig. 3.4(b)), y a partir de ellas la relación global (aproximadamente 1:1) entre la entrada de control y el sensado de velocidad (Fig. 3.4(c)). Esta última representa la planta electromecánica a ser controlada mediante procesamiento analógico y/o digital de señales, en el prototipo de banco de laboratorio.

Finalmente, en adelante se considerará como punto de operación del sistema al valor medio del rango útil; es decir, 6.515 V en la tensión que representa la velocidad de rotación sensada en el motor.

3.2 Escenarios de análisis para los lazos de control

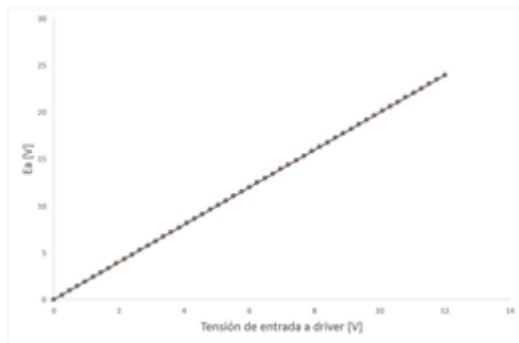
Con el objetivo de analizar la respuesta de los circuitos diseñados para realizar las tareas de control del sistema (procesado de señal) se efectuaron simulaciones en MultiSim, inicialmente para las realizaciones analógicas empleando amplificadores operacionales.

Como resultado de ello, la Fig. 3.5 muestra el comportamiento para la acción de control proporcional del sistema en lazo abierto y ante diferentes valores de ganancia k_p . De esta manera, se observa en trazo rojo la señal aplicada en la entrada del circuito a manera de señal de error. Por su parte, en trazo azul se verifica una salida de control (esfuerzo de control o variable manipulada) proporcional al parámetro de ganancia.

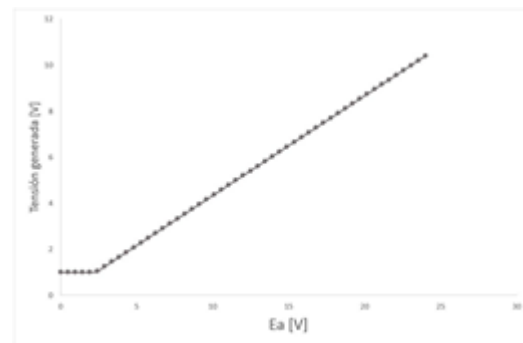
De otro lado, la Fig. 3.6 ilustra el comportamiento en lazo cerrado ante el mismo escenario de variación de parámetros de acción proporcional. En este caso, se acopla en cascada el circuito equivalente para la planta definido previamente en la Fig. 3.3, con salida representada por la señal en trazo verde (variable controlada). A partir de ello, es evidente la manera en la cual el lazo de control proporcional atenúa el efecto provocado por una perturbación de tipo escalón (señal en trazo rojo), siendo mayor el efecto de control (señal en trazo azul) para valores mayores de k_p . La perturbación aplicada corresponde con una señal constante de -2 V , adicionada a la medida del sensor de velocidad. Es importante hacer notar que para el rango de ganancias considerado no existe saturación en las señales del lazo de control.

Figura 12.

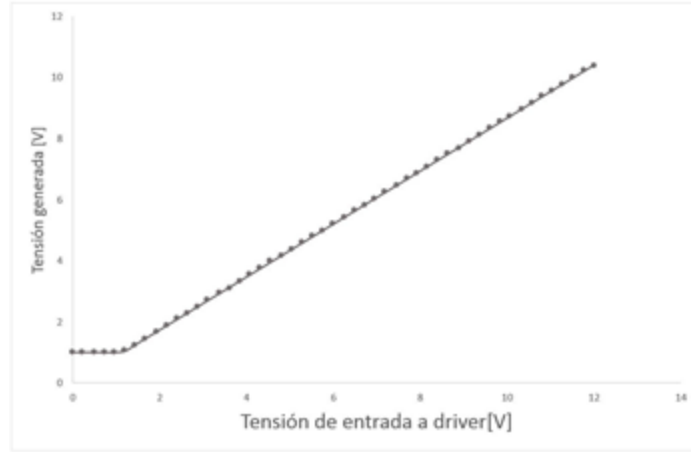
Funciones de transferencia estáticas para equivalente circuital del conjunto driver motor-dinamo



(a) salida de driver vs. entrada de control



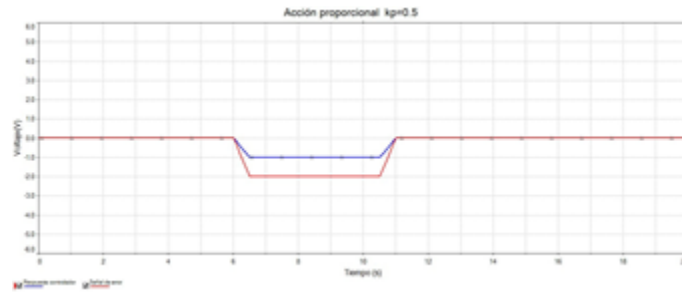
(b) salida de dinamo vs. Ea



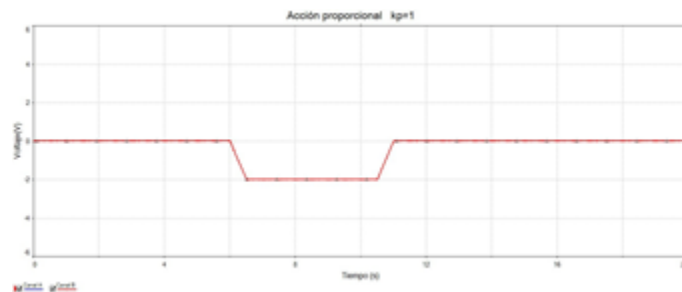
(c) salida de dinamo vs. entrada de control

Figura 13.

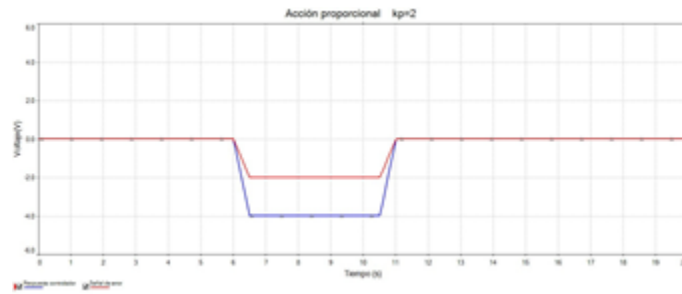
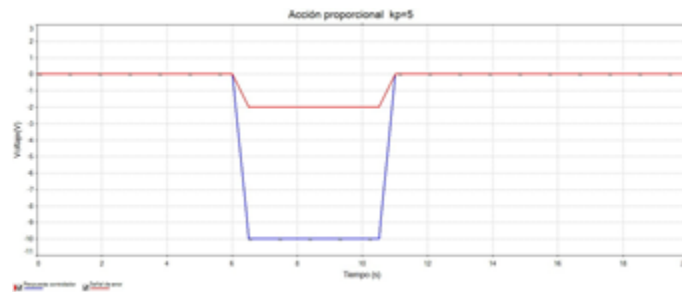
Acción de control proporcional en lazo abierto ante diferentes valores de ganancia



(a) $k_p = 0.5$



(b) $k_p = 1$

(c) $k_p = 2$ (d) $k_p = 5$

De manera similar, la Fig. 3.7 permite observar el comportamiento para la acción de control integral en lazo abierto para $k_i = 1$. A partir de ello, se observa que efectivamente el escalón de entrada (señal de error en trazo rojo) es integrado mediante una recta con pendiente negativa en su salida (esfuerzo de control en trazo azul) que eventualmente se satura en el valor límite de voltaje configurado para el amplificador.

Por su parte, la Fig. 3.8 ilustra el comportamiento en lazo cerrado ante diferentes valores de la ganancia k_i , de lo cual se verifica la eliminación del error en estado estable y la aparición de oscilaciones típicas para este tipo de acción de control. Adicionalmente, se observa una tolerancia interesante del circuito manteniendo estabilidad ante valores grandes del parámetro k_i .

Así entonces, es posible combinar las acciones básicas de control mediante un esquema PI (proporcional-integral), cuya simulación en lazo cerrado para diferentes valores de ganancias k_p y k_i se muestra en la Fig. 3.9 presentando resultados que verifican la complementariedad de las

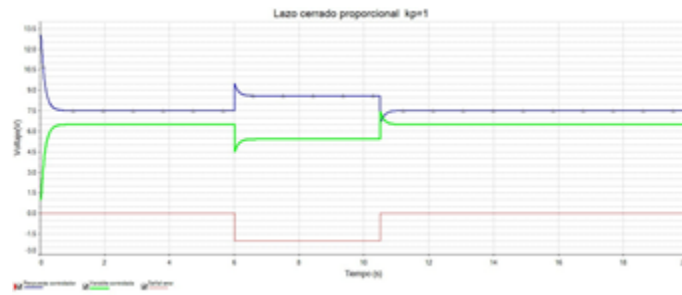
acciones de control y facilitan la obtención de un espectro diferente de dinámicas asociadas al sistema ante las posibles asignaciones en sus parámetros de control.

Ahora bien, con el ánimo de crear un comparativo entre el esquema de control analógico implementado a través de amplificadores operaciones y la correspondiente realización digital para los algoritmos de procesamiento de datos, se hizo uso en MultiSim de los Módulos para Simulación de Control de Procesos sugeridos en (García, 2020), particularmente: 1) Voltage Gain Block para el control proporcional y 2) Voltage Integrator para el control integral, además de su respectiva combinación para el caso PI.

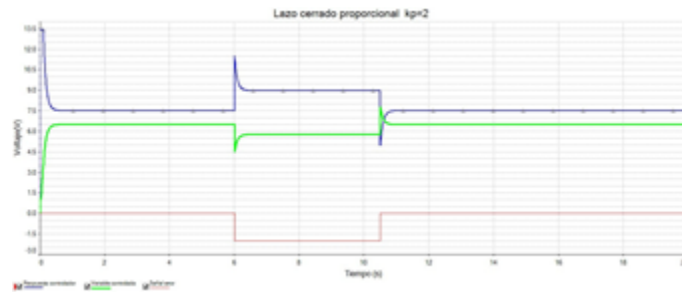
De esta manera, siguiendo la metodología propuesta por Centeno y Moreno en (Centeno, 2014), se aplicó la señal ilustrada mediante el trazo rojo de la Fig. 3.10 como entrada para los esquemas de control proporcional, integral y PI, simulando un estímulo de error pseudoaleatorio para excitar la mayor cantidad de componentes frecuencia les en la dinámica del bloque de control. Como resultado, se obtuvieron las respuestas presentadas en trazos azules (para la salida de control o variable manipulada) y en trazos verdes (para la salida de la planta o variable controlada) de la Fig. 3.10, a partir de las cuales se observa una capacidad interesante de los módulos de control implementados en MultiSim para conservar regulada la salida del sistema a pesar de las variaciones aplicadas en el estímulo de entrada.

Figura 14.

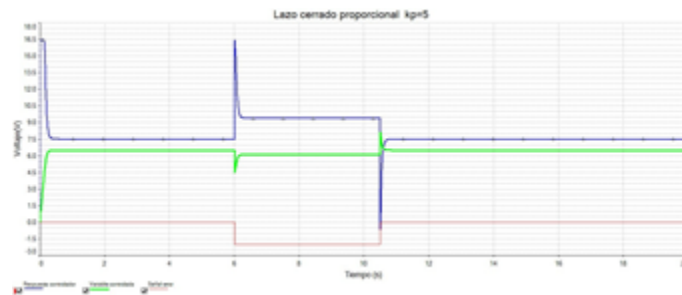
Acción de control proporcional en lazo cerrado ante diferentes valores de ganancia



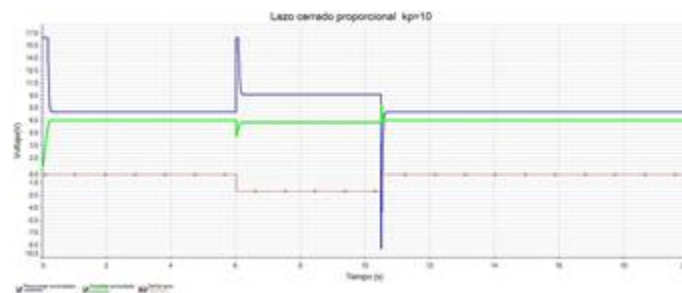
(a) $k_p = 0.5$



(b) $k_p = 1$



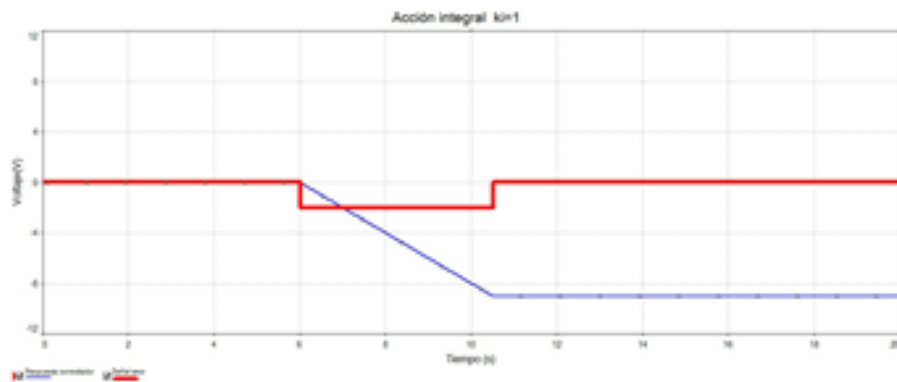
(c) $k_p = 2$



(d) $k_p = 5$

Figura 15.

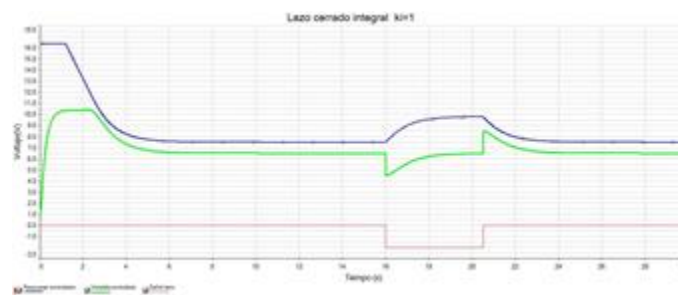
Acción de control integral en lazo abierto para $k_i = 1$

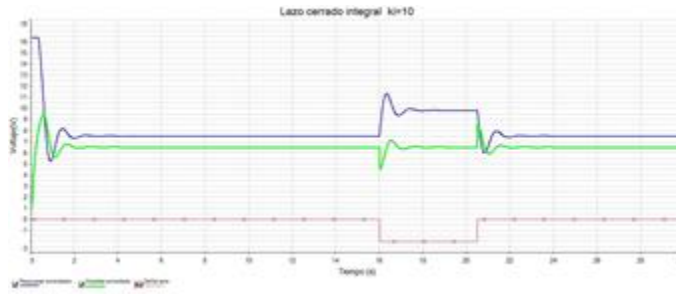


Más aún, este procedimiento fue replicado en las realizaciones circuitales mediante amplificadores operacionales y a través de ello se obtuvieron las mismas formas de onda. Lo anterior permite verificar no solamente el apropiado diseño de los circuitos analógicos propuestos, sino también ilustrar la viabilidad para obtener realizaciones digitales exitosas de los algoritmos de control a partir de una programación apropiada del dispositivo dedicado al proceso digital de la información de los lazos del sistema.

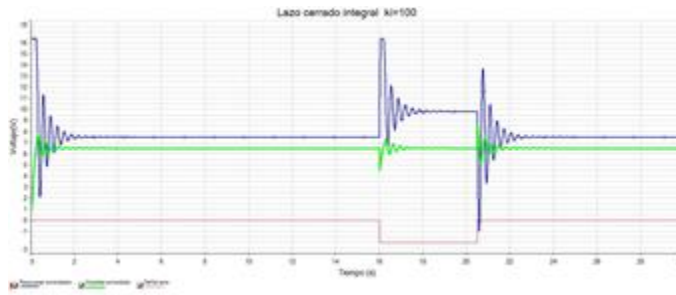
Figura 16.

Acción de control integral en lazo cerrado ante diferentes valores de ganancia

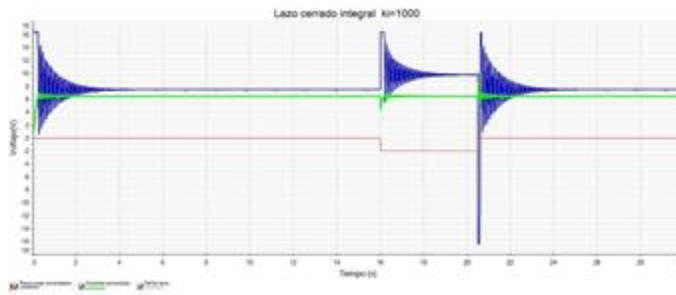
(a) $k_i = 1$



(b) $k_i = 10$



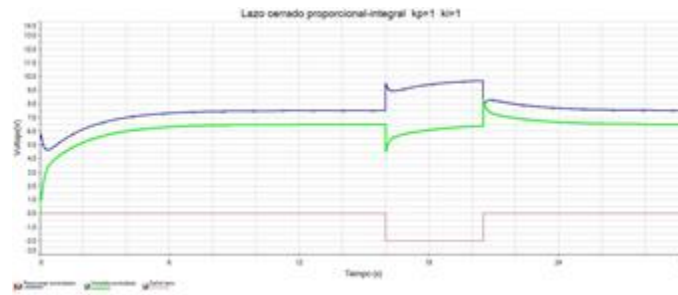
(c) $k_i = 100$



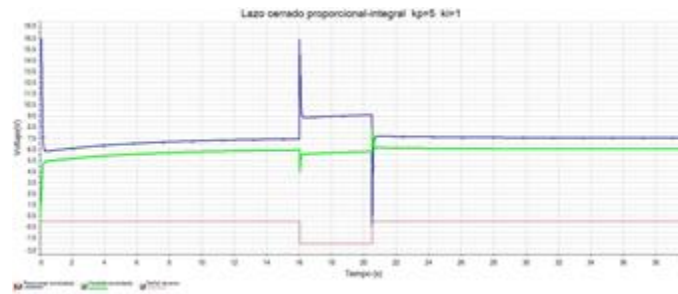
(d) $k_i = 1000$

Figura 17.

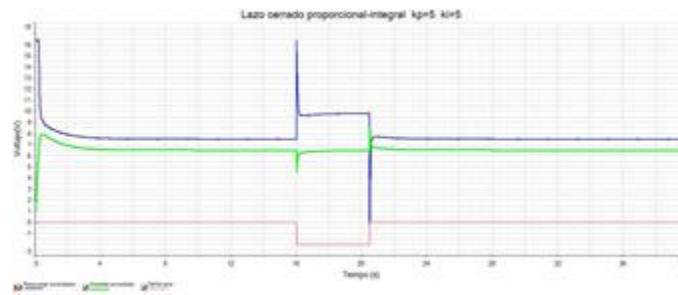
Acción de control PI en lazo cerrado ante diferentes valores de ganancias



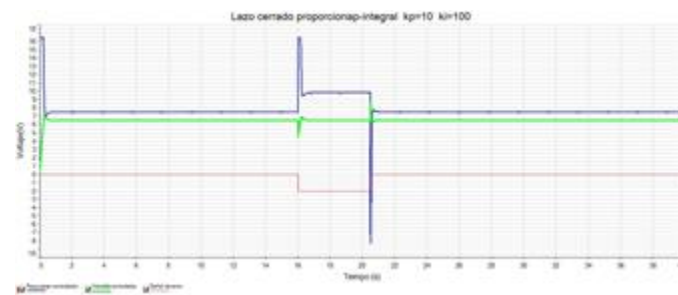
(a) $k_p = 1, k_i = 1$



(b) $k_p = 5, k_i = 1$



(c) $k_p = 5, k_i = 5$



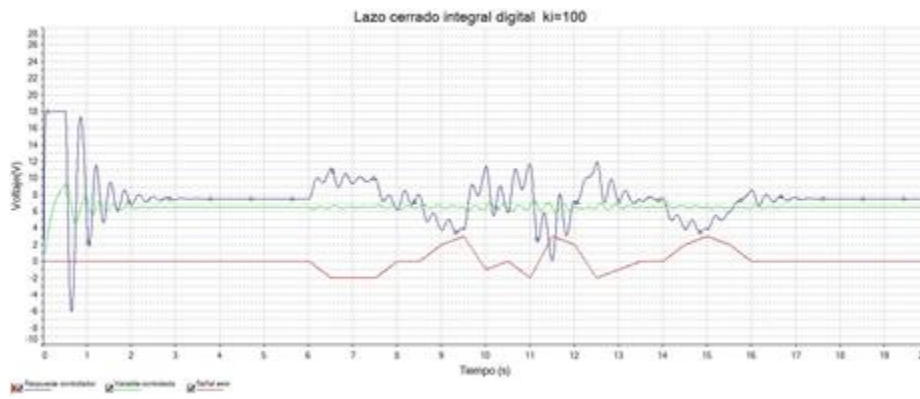
(d) $k_p = 10, k_i = 100$

Figura 18.

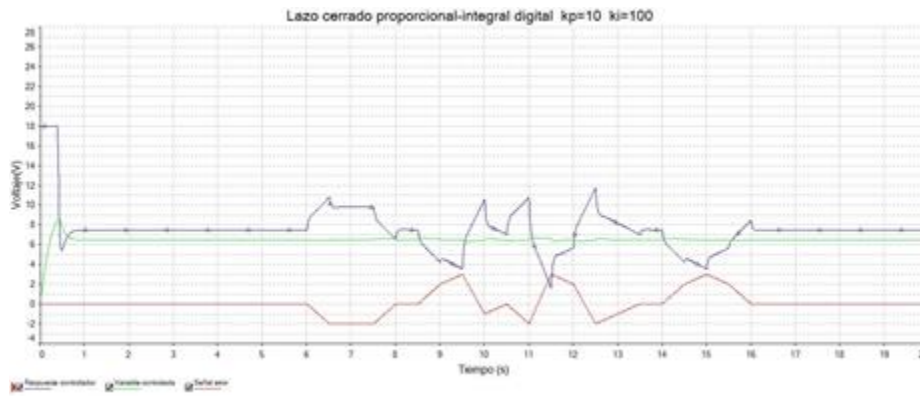
Respuesta de controladores ante estímulo de error para realización compacta (módulos MultiSim)



(a) Proporcional



(b) Integral



(c) PI

4. Conclusiones

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

Se diseñó un prototipo de bajo costo a partir de elementos comerciales disponibles en el mercado local, para ser empleado en prácticas de la asignatura Control de Sistemas Eléctricos del Programa de Ingeniería Eléctrica de la E3T-UIS, considerando un servomecanismo basado en el control de velocidad de un motor de corriente continua sometido a perturbaciones en el acoplamiento de su eje de rotación. Con el ánimo de recrear experiencias didácticas en los estudiantes, se propuso un esquema simple de control que permite visualizar los efectos de las acciones básicas de tipo proporcional e integral, al igual que su combinación en el modo PI, a través de realizaciones analógicas mediante amplificadores operacionales, así como también digitales empleando algoritmos programados en un procesador de bajo costo.

De manera más puntual:

Se definieron las características para un banco de laboratorio que permitiera verificar el comportamiento dinámico de un sistema eléctrico. Tal y como fue abordado en la Sección 2.1, se planteó la construcción de un banco de laboratorio basado en un servomecanismo para verificar los fundamentos teóricos del control clásico, tomando en cuenta su simplicidad de operación, su bajo costo, su reducida necesidad de espacio y la posibilidad de replicación a partir de elementos de fácil consecución en el mercado local. Detalles particulares para la estructura del prototipo de laboratorio propuesto se ilustran en la Fig. 2.1.

Se dimensionaron y seleccionaron elementos comerciales para la etapa de potencia del sistema. En particular, la Sección 2.2 realizó una descripción para los elementos seleccionados para constituir la componente de potencia (mecánica y eléctrica) del sistema. A través de ello, se determinaron las características para un motor de corriente continua de 250 W a 24 VDC, con su correspondiente interfaz de potencia constituida por un driver que permite entregar hasta 960 W a 24 VDC (equivalentes a una corriente máxima de 40 A) empleando modulación de ancho de pulso, además de su respectiva fuente de poder con tensión de salida de 24 VDC / 20 A y potencia nominal de 480 W.

Se diseñaron y simularon los circuitos de baja potencia y de proceso de señal del sistema. A partir de la configuración propuesta mediante el diagrama esquemático de la Fig. 2.4, se define una arquitectura circuital híbrida para realizar el procesamiento de señales del lazo de control del sistema. La palabra híbrida en este contexto, refiere la posibilidad de realizar controladores clásicos mediante circuitos analógicos basados en amplificadores operacionales y también mediante algoritmos implementados en un procesador ARDUINO UNO. Detalles específicos para la selección de componentes se explican en la Sección 2.4. Por su parte, el Capítulo 3 dedica la mayor parte de su contenido a ilustrar los resultados de simulación de los circuitos haciendo uso de la herramienta MultiSim de National Instruments.

Se diseñó la distribución espacial para los diferentes elementos en el prototipo de laboratorio. Más precisamente, en la Sección 2.5 se aplicaron las recomendaciones de diseño sugeridas en (Rodríguez, 2012), para concebir la organización de elementos en la interfaz de usuario requerida para la correcta operación del prototipo de laboratorio. A partir de ello, se diseñaron los esquemas de operación del sistema y la correspondiente distribución espacial para

los elementos del banco ilustrada mediante el esquema tridimensional de la Fig. 2.8. Características adicionales para el prototipo de laboratorio diseñado se detallan en la Sección 2.6.

4.1 Recomendaciones

La caracterización de operación del dispositivo de sensado de velocidad (dinamo), se realizó sobre la base de experimentos aplicados a un motor disponible en el laboratorio. No obstante, se recomienda repetir dicha caracterización y ajustar los diseños de manera conforme, para el caso de la verificación experimental realizada sobre el motor de corriente continua que sea utilizado en el montaje definitivo.

4.2. Trabajo futuro

Un complemento natural para el presente trabajo de grado corresponde con la implementación física del prototipo de laboratorio y su integración a las actividades prácticas de la asignatura Control de Sistemas Eléctricos

Referencias Bibliográficas

- Amatrol. (2017). *Training systems for industrial process control education*.
- Angels, D. R. (2009). *La practica reflexiva en la formación inicial de maestros. evaluaci´on de un modelo*, Ph.D. thesis, Universitat Internacional de Catalunya.
- Angulo, C. G. (2012). *Practicas de referencia en la gesti3n de parques cient´ifico tecnologicos*, Ph.D. thesis, Universidad Industrial de Santander.
- Arias, L. ´A., & Rangel, S. C. (2013). *Arranque y frenado del motor de inducci3n y de corriente continua de excitaci3n independiente: control mediante PLC*, Trabajo de grado (ingenier´ia el´ectrica), UIS.
- Barrera, P. D., & P3rez, B. O. (2009). *Procedimientos de prueba para el laboratorio de m´aquinas el´ectricas*, Trabajo de grado (ingenier´ia el´ectrica), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Centeno, D. M. (2014). *Comparative analysis of performance of switching control techniques running on digital devices*, Ingenier´ia y Competitividad .
- Contreras, V. E., & S´anchez, R. R. (2010). *Dise˜no y construcci3n de un banco de pr´acticas en motores el´ectricos, como apoyo a la asignatura dise˜no de m´aquinas II*, Trabajo de grado (ingenier´ia mec´anica), UIS.
- Feedback. (2000). *Electrical power & machines range:60-070*.
- Feedback, I. (2000). *Educational Equipment, Analogue servo trainer: 33-002 usb*.
- Franco, M. ´E., Posada, J., & Ram´irez, J. M. (2008). *Banco de pruebas para motores de inducci3n*, Energ´ia y Computaci3n .
- Garc´ia, V. J. (2020). *Laboratorio virtual: Controladores con MultiSim*.
- Mu˜oz, M. C., & Salgado, L. E. (2016). *Procedimientos de prueba para el laboratorio de m´aquinas el´ectricas*, Trabajo de grado (tecnolog´ia en electricidad), Universidad Distrital Francisco Jos3 de Caldas, Bogot´a D.C., Colombia.
- Mu˜oz, S. S., Sarmiento, C. G., & Guar´in, M. D. (2013). *Instrumentaci3n y control de velocidad para un motor de corriente alterna en el laboratorio de control e instrumentaci3n de la E3T-UIS*, Trabajo de grado (ingenier´ia el´ectrica e ingenier´ia electr3nica).

- Noreña, J. F. (2012). *Desfinanciamiento de la educación superior en Colombia: La realidad de la crisis en el sistema de financiación de las universidades estatales*, Pereira, Colombia.
- Ortiz, Ortiz Carlos Augusto; Pinzón, Abril Diego Enrique. (2016). Diseño y construcción de un banco de laboratorio para el control y análisis de descongelamiento en un sistema de refrigeración, Trabajo de grado (ingeniería mecánica), UIS. Bucaramanga, Colombia.
- Páez, E. J. (2014). *Módulo de pruebas para prácticas de laboratorio en electrónica analógica y digital versión 1.0*, Vestigium - Revista Académica Universitaria.
- Plazas, R. R., & Ramírez, J. M. (2012). *Herramientas de experimentación local en los sistemas de control: una revisión*, IX Congreso Internacional Electrónica y Tecnologías de Avanzada (CIETA) (San José de Cúcuta, Colombia),.
- Rodríguez, d. A. (2012). *Buenas prácticas para diseño de HMI de alto rendimiento*, Trabajo de grado (ingeniería electrónica), Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena, Colombia.
- Suarez, H. J., & Duarte, F. W. (2016). *Automatización de procesos: desarrollo de material didáctico basado en el PLC Compactlogix1769-l32E*, Trabajo de grado (ingeniería electrónica). UIS.
- Suarez, P. I., Mateus, L. C., Escamilla, M. D., Rojas, L., & Enciso, J. F. (2013). *Avances en la organización e historia institucional de fondos judiciales. archivo historico regional. UIS. Revista Electronica de Fuentes y Archivos No. 4, 323–338.*
- Tasco, Q. A., & Rojas, J. M. (2013). *Diseño de una interfaz grafica en Lab.ViEW e implementación de un controlador electrónico para motores de inducción trifásicos utilizando microcontroladores de propósito específico*, .
- Villota, C. J., & Mosquera, V. M. (2006). *Rediseño HMI de display para plantas de pulpa y calderas PROPAL*, Trabajo de grado (ingeniería mecatrónica), Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia.