

CONSTRUCCIÓN DE GUÍAS DE LABORATORIO PARA SISTEMAS DE
CONTROL LINEAL UTILIZANDO EL BANCO DE SERVOMECANISMO UV

RICARDO ANDRÉS PÉREZ GARCÍA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN CONTROL INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI 2015

CONSTRUCCIÓN DE GUÍAS DE LABORATORIO PARA SISTEMAS DE
CONTROL LINEAL UTILIZANDO EL BANCO DE SERVOMECANISMO UV

RICARDO ANDRÉS PÉREZ GARCÍA

Trabajo de Grado presentado como requisito para
optar al título de Ingeniero Electricista

Director
Ing. Edinson Franco Mejía, Ph.D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN CONTROL INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI 2015

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Amparo García y mi papá Javier Pérez por su cariño y apoyo incondicional.

A la Universidad del Valle y el Grupo de Investigación en Control Industrial GICI por el soporte académico y material para el desarrollo de este trabajo de grado.

Al director de este trabajo de grado el Ingeniero Edinson Franco Mejía, Ph.D por la asesoría técnica y contribución significativa para vencer las dificultades que se presentaron en el transcurso de este trabajo.

A los estudiantes Lorena Insuasty, Mauricio Castro, Mauricio Patiño, Julián Castillo, Stiven Rosero, que colaboraron en la validación de las prácticas experimentales, además de aportes y observaciones que permitieron enriquecer el trabajo.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN	10
1 MARCO TEÓRICO	12
1.1 PRÁCTICAS DE LABORATORIO	12
1.1.1 Metodología	12
1.1.2 Niveles de abertura	14
1.1.3 Pautas para la elaboración de las prácticas	15
1.1.4 Documento guía	16
1.2 CONOCIMIENTO DEL PROCESO	16
1.2.1 Servomecanismo	16
1.2.2 Motor síncrono	17
1.2.3 Elementos de realimentación	19
1.2.4 Variador de frecuencia	20
1.2.5 Filtros análogos	21
1.2.6 Servomecanismo UV	22
1.2.6.1 Componentes	23
1.2.6.2 Funcionamiento principal	29
1.2.6.3 Estructura del sistema de control	30
1.2.6.4 Rangos y límites de operación del sistema	31
1.2.6.5 Manejo del software STARTER	32
1.3 CONCEPTOS EN FORMACIÓN EN SISTEMAS DE CONTROL LINEAL	33
2 DISEÑO METODOLÓGICO	35
3 RESULTADOS	37
3.1 DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA	37
3.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	38
3.3 SISTEMA DE CONTROL A TRABAJAR	44
3.4 LISTADO DE LAS PRÁCTICAS	46
3.5 OBJETIVOS, MATERIALES, MARCO TEÓRICO Y PROCEDIMIENTO	47
3.5.1 Práctica 1: Reconocimiento de la bucla típica de realimentación y manejo de la herramienta computacional STARTER para el control de velocidad del Servomecanismo UV	47
3.5.2 Práctica 2: Respuesta en el tiempo y modelado de sistemas dinámicos para control de velocidad	49
3.5.3 Práctica 3: Lugar Geométrico de las Raíces para el Sistema de Control de velocidad del servomecanismo UV	51
3.5.4 Práctica 4: respuesta en frecuencia del control de velocidad para el Servomecanismo UV	53
3.5.5 Práctica 5: Análisis y sintonía de las acciones de control P y PI para el control de velocidad del servomecanismo UV	55

3.5.6	Práctica 6: Diseño de controladores P y PI por medio del lugar geométrico de las raíces para el control de velocidad del servomecanismo UV	59
3.5.7	Práctica 7: Sistema de control de posición y manejo de la función tecnológica posicionador simple para el Servomecanismo UV.....	61
3.5.8	Práctica 8: Respuesta en el tiempo y modelado de sistemas dinámicos para control de posición del Servomecanismo UV.....	63
3.6	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....	66
4	VALIDACIÓN	68
4.1	METODOLOGÍA	68
4.2	FORMULARIO DE ENCUESTA.....	68
4.3	RESULTADOS.....	70
4.3.1	Discusión de resultados.....	71
5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	72
5.1	CONCLUSIONES	72
5.2	TRABAJOS FUTUROS.....	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	74
	ANEXOS.....	78

LISTAS DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Comparación entre enfoque Conductista vs constructivista.....	14
Tabla 2. Niveles de abertura.....	14
Tabla 3. Sinopsis de interfaces de la CU305 DP	25
Tabla 4. Acción Proporcional P (Variación de la ganancia k_p)	57
Tabla 5. Acción Proporcional Integral PI (variación de ganancia K_p y acción integral T_i)	58
Tabla 6. Diseño de la acción Proporcional P	60
Tabla 7. Diseño de la Acción Proporcional Integral PI	61
Tabla 8. Encuesta Grupo 1	70
Tabla 9. Encuesta Grupo 2	70
Tabla 10. Encuesta Grupo 3	71

LISTAS DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Sistema básico de Control de un Servosistema	17
Figura 2. Circuito equivalente de un motor DC	17
Figura 3. Incrementador optomecánico	19
Figura 4. Variador de frecuencia.....	21
Figura 5. Servomecanismo UV	22
Figura 6. Variador de velocidad Sinamics s110	23
Figura 7. Unidad de potencia PM340.....	24
Figura 8. Unidad de control CU305.....	24
Figura 9. Conexión del captador a través de un Sensor Module Cabinet	26
Figura 10. Sensor Module Cabinet SMC20	26
Figura 11. Motor síncrono 1FK7	27
Figura 12. Adaptador Simatic PC USB A2	28
Figura 13. PLC SIMATIC S7-300.....	28
Figura 14. Elementos de mando y señalización de la CPU 312 y CPU 314	29
Figura 15. Servorregulación de velocidad.....	30
Figura 16. Estructura del sistema de control del Servomecanismo UV	31
Figura 17. Página de presentación de estructura	39
Figura 18. Contenido del diseño de la estructura.....	40
Figura 19. Diseño de estructura (introducción, metodología, evaluación nomenclatura).....	41
Figura 20. Diseño de estructura (objetivos, materiales, tiempo, prerequisites y preinforme).....	42
Figura 21. Diseño de estructura (introducción, objetivos específicos, marco teórico, procedimiento, informe y bibliografía)	43
Figura 22. Lazo de control PI equivalente para el Control de velocidad	44
Figura 23. Sistema de control PI de velocidad del Servomecanismo UV	44
Figura 24. Sistema de control PI de posición del Servomecanismo UV	45
Figura 25. Sistema de control PI de posición del Servomecanismo UV equivalente	45
Figura 24. Sistema de control con acción proporcional de ganancia k_p	55

LISTAS DE ANEXOS

pág.

Anexo A. Prácticas de Control Lineal para el Servomecanismo UV	79
Anexo B. Manual de operación para el control de velocidad y posición del Servomecanismo UV utilizando STARTER	81
Anexo C. Formulario recursos físicos remotos	83
Anexo D. Encuestas realizadas a los estudiantes a partir del formulario de evaluación propuesto para la validación de las prácticas experimentales.	86

RESUMEN

En el presente trabajo se describió el desarrollo de la construcción de prácticas de laboratorio de Sistemas de Control Lineal utilizando el Servomecanismo UV. Para esta construcción se tuvieron en cuenta las diferentes características de funcionamiento y tecnología de la plataforma de experimentación (diseñando un manual de operación de este servomecanismo) y de acuerdo con los métodos o temas vistos en las prácticas de laboratorio, se propuso un prototipo de prácticas experimentales en el cual se tuvo en cuenta la metodología o estrategia de aprendizaje requerida para el desarrollo, con el fin de obtener un aprendizaje en Sistemas de Control Lineal para el Servomecanismo UV.

Palabras Clave: Servomecanismo UV, prácticas experimentales, metodología.

ABSTRACT

This report shows the development of some experimental activities in Linear Control Systems using the Servomecanismo UV. The proposed experiments considered the performance and components of a testing platform (developing its operation manual). According to the topics and the methodology used in the experiments, a set of basic laboratories was planned. Strategies and learning methods were considered for the design of the experiments as an aim in Linear Control Systems knowledge acquisition.

Index Terms: Servomecanismo UV, laboratories, methodology.

INTRODUCCIÓN

La EIEE está desarrollando proyectos que permitan a los estudiantes mejorar las habilidades técnicas y de conocimiento tecnológico para el futuro desempeño laboral; específicamente en la línea de educación. Los Grupos de Investigación en Control Industrial y PSI desde el año 2002, inician a investigar en metodologías y herramientas para la educación en control con el proyecto “Plataforma para Instrumentación Industrial -PI2-”, Colciencias 1106-14-12796, 2003-2005 (Caicedo Bravo & Ramírez Scarpetta, 2004), posteriormente esa línea se continua en los proyectos “Plataforma de procesamiento distribuido con acceso remoto multiusuario y emulación de sistemas dinámicos, para investigación y educación en ingeniería”, Colciencias 1106-11-17707-Contrato 234-2005-(Ramírez Scarpetta, 2008) y el proyecto “Entorno de aprendizaje basado en proyectos para sistemas de control”, Colciencias 11065212845,-Contrato 401-2011-(Ramírez Scarpetta, & Fernandez Samacá, 2011). En este último se desarrollan varios objetos de aprendizaje asociados a diferentes competencias, todos estos trabajos finalizaron abordando metodologías de aprendizaje activo. Una de las herramientas diseñadas se denomina “Banco de Servomecanismo UV” (bajo la dirección de los profesores Jorge E. Quintero y Edinson Franco) y su objetivo es modernizar el área de servomecanismos del Laboratorio de Automática; una vez finalizado el desarrollo de este Banco el problema que seguía consistía en resolver la necesidad de diseñar las guías de aprendizaje (o prácticas de laboratorio) para la formación en Sistemas Automáticos de Control para los programas de Ingeniería.

El banco fue producto de una serie de trabajos de grados los cuales permitieron su diseño e implementación, comenzando con el trabajo de grado que tiene como nombre “Diseño y construcción de un prototipo de laboratorio remoto y virtual para educación en fundamentos de control usando herramientas de libre distribución” (Delgado S., 2008) realizado en el año 2008, y posteriormente con el proyecto de grado que tiene como título “Diseño de un módulo didáctico de Accionamientos para Máquinas de Inducción” (Cortes R. & Rengifo O., 2011) realizado en el año 2011, que a su vez sirvieron como soporte para el desarrollo del trabajo de grado “Plataforma de experimentación con servomecanismos para propósitos de educación en automatización y control” desarrollado en el año 2014 (Caicedo C., 2014) con el cual se finalizó con éxito la construcción del Banco de Servomecanismos UV.

Es de gran importancia adquirir conocimiento en el análisis y en la solución de problemas de ingeniería que se presenten en la industria, ya que esto permite adquirir herramientas necesarias para los problemas típicos a los que se enfrenta un ingeniero en su etapa profesional. Los cursos de formación en Sistemas de Control, accionamientos eléctricos, electrónica de potencia, sistemas secuenciales,

entre otros, ofrecen herramientas conceptuales para desarrollar el aprendizaje de este tipo de problemas; con la plataforma de Servomecanismos UV de características industriales se busca que los estudiantes adquieran habilidades necesarias para su futuro desempeño profesional haciendo más directa la inserción al sector laboral; por lo tanto existe la necesidad de desarrollar las guías de aprendizaje para el banco de Servomecanismos UV que permitan a los estudiantes de ingeniería aprender a usar la plataforma, a analizar y estudiar los conceptos de Sistemas Automáticos de Control, a enfrentarse a la solución de problemas y de proyectos de automatización y control.

Para dar solución al problema se propuso como objetivo general diseñar las guías de laboratorio de Sistemas de Control lineal para el Banco de Servomecanismos UV, este objetivo general está compuesto por objetivos específicos los cuales fueron proyectados de la siguiente manera:

- Estudiar a profundidad la estructuración y operación del Banco de Servomecanismos UV.
- Especificar la estructura de las guías y las prácticas de laboratorio a diseñar.
- Realizar las especificaciones para cada una de las prácticas a diseñar.
- Diseñar las prácticas especificadas y validar su funcionamiento.
- Elaborar los documentos: Guías de laboratorio y manuales para los instructores.

El libro está organizado de la siguiente manera, en el capítulo 1 se muestran los métodos o la fundamentación teórica empleada en el desarrollo del trabajo, en este se realiza una investigación acerca de las metodologías implementadas en prácticas experimentales, se muestran conceptos fundamentales empleados en control de Servomecanismos, y se describen los materiales, la estructura y el funcionamiento del Servomecanismo UV. En el capítulo 2 se presenta el diseño metodológico desarrollado para dar solución al problema planteado. El capítulo 3 corresponde a los resultados obtenidos a partir del estudio de la estructura, funcionamiento y aplicaciones del Banco de servomecanismos UV para el laboratorio de Sistemas Control Lineal y del diseño de guías experimentales, este estudio permite diseñar e implementar las prácticas de laboratorio especificando la metodología o estrategia pedagógica, la estructura, el sistema de control a trabajar, así como el listado de las prácticas, los objetivos, materiales y marco de referencia empleado. El capítulo 4 corresponde a la validación de las guías diseñadas o prácticas, en este capítulo se especifica el método de validación para las guías. El capítulo 5 corresponde a las conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo, en donde se evalúa el alcance de los objetivos especificados y los resultados obtenidos, además se plantearan trabajos futuros que permita complementar el trabajo presente.

1 MARCO TEÓRICO

Este capítulo contiene información necesaria para el diseño e implementación de las prácticas de laboratorio, se presenta una revisión de las metodologías empleadas en prácticas experimentales, información del sistema conocido como servomecanismo y de los materiales empleados, los métodos, la estructura y el funcionamiento del Servomecanismo UV para el aprendizaje de Sistema de Control Lineal.

1.1 PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Las prácticas experimentales o de laboratorio son actividades didácticas o estrategias pedagógicas basadas en experiencias que cuestionan el conocimiento y habilidades de una disciplina, en estas actividades se debaten los conceptos, procedimientos, métodos y tecnologías que permiten su ejecución; además se determinan datos experimentales, se interpreta y valida la información para finalmente obtener conclusiones. Las actividades experimentales además de tener un papel de apoyar los fundamentos teóricos de cualquier área del conocimiento, tienen un papel de despertar y desarrollar la curiosidad en los estudiantes, facilitando la solución, explicación y comprensión de los fenómenos que interactúan con la cotidianidad.

Para un diseño correcto de una práctica es importante que la metodología empleada posibilite relacionar y dar continuidad el conocimiento teórico con el experimental, además de conocer a detalle los elementos o componentes que intervienen en el desarrollo (Aleman & Mata, 2006).

1.1.1 Metodología

El método tradicional (conductista) empleado en las prácticas de laboratorio es de tipo expositivo o tipo receta, en este método el docente decide el tema a investigar, los elementos, el procedimiento, los datos a obtener y su organización. El principal inconveniente del desarrollo de estas prácticas es lo poco representativo que son de lo que realmente es la actividad científica, este estilo de prácticas es poco efectivo por dos razones:

- La mayoría del tiempo de la práctica el estudiante dedica más atención a la validación de los resultados que a la planificación y organización de experimento.
- Las prácticas en un alto porcentaje son guiadas, dejando poco espacio para la creatividad y mucho espacio para el desarrollo de habilidades técnicas.

Algunos aspectos que mejoran el esfuerzo cognitivo en este estilo de prácticas es (González, 2009):

- Hacer que los estudiantes definan e identifiquen las variables más importantes.
- Conseguir que los estudiantes seleccionen y comparen diferentes técnicas de consultas de información.
- Propiciar que los estudiantes sugieran y modifiquen posibles errores en el desarrollo de las prácticas.
- Hacer que los estudiantes realicen el procedimiento de las prácticas o reducir la información facilitada.

Lo importante de las prácticas radica en la facilidad de comprensión de conceptos y la claridad de un propósito, y no de facilitar el aprendizaje de ciencia creando conductas sobre los estudiantes sin desarrollar un nivel cognitivo y creativo suficiente.

En el método constructivista, las prácticas de laboratorio cumplen un papel importante en el proceso enseñanza y aprendizaje, dirigiendo de manera intencional las ideas previas del estudiante a una evolución de conceptos elaborados y próximos a los científicos. Para dirigir al estudiante es necesario realizar una actividad en el laboratorio donde se formulen preguntas para establecer una relación entre lo que el estudiante sabe, lo que debe saber y la experiencia en función de los temas estudiados.

La principal dificultad para lograr los objetivos de este enfoque es el desconocimiento por parte de algunos docentes de las estrategias de aprendizaje adecuadas que relacionen lo teórico con lo práctico. Un detalle principal en el conocimiento de las ciencias son las teorías, estas se obtienen a partir de una relación entre un modelo teórico y un dominio de los fenómenos asociados a un tema, de modo que para transmitir el conocimiento de estas teorías es fundamental contar con un contexto apropiado e intervenir en el de forma consciente y reflexiva.

Dependiendo del enfoque de aprendizaje o el modelo de enseñanza, el contenido de actividades de cada práctica varía, en el modelo de enseñanza transmisión-recepción (conductista) el tiempo implementado en las prácticas es menor y el objetivo principal es ejemplificar la teoría. En el modelo de enseñanza por descubrimiento (constructivista) el tiempo dedicado a la práctica es mayor y el objetivo es aprender haciendo. La tabla 1 establece un cuadro comparativo entre estos dos enfoques (López & Tamayo, 2012).

Tabla 1. Comparación entre enfoque Conductista vs constructivista

Enfoque conductista	Enfoque constructivista
Verificar un tema teórico	El profesor actúa como guía, facilitando aprendizaje
Prácticas única fuente de validez del conocimiento científico, de las hipótesis y teorías	La experiencia desempeña un papel importante pero no es la única fuente de validación
Exigir a los estudiantes que sigan conductas para llegar a una conclusión establecida	El profesor debe informarse sobre las destrezas, dificultades y conocimientos del estudiante
Percibir laboratorio como un espacio donde se experimenta pero no se comunica el significado de la experimentación	El profesor centra su atención en aspectos sociales del aprendizaje
Proceder arbitrariamente a manipular aparatos y a realizar apuntes sin tener un objetivo claro	Elegir las experiencias científicas apropiadas para la clase

Fuente: Tabla 1. Concepción de las prácticas experimentales, página 150 (López & Tamayo, 2012)

1.1.2 Niveles de abertura

El nivel de abertura se conoce como la proporción en la que el docente facilita los problemas, los procedimientos y soluciones de las prácticas experimentales, existen diversas clasificaciones de los niveles abertura en las prácticas experimentales. Con el fin de identificar el nivel de abertura de estas prácticas se empleó la clasificación hecha por Herrón (1971) ver tabla 2.

Tabla 2. Niveles de abertura

Nivel	Nombre	Objetivo	Material	Método	Solución	Estilo de práctica
0	Demostración	Dado	Dado	Dado	Dada	Expositivo
1	Ejercicio	Dado	Dado	Dado	Abierta	Expositivo
2	Investigación estructurada	Dado	Dado todo o en parte	Dado en parte o abierto	Abierta	Expositivo Investigación
3	Investigación abierta	Dado	Abierto	Abierto	Abierta	Investigación
4	Proyecto	Dado en parte o abierto	Abierto	Abierto	Abierta	Investigación

Fuente: Tabla 2. niveles de abertura según Herron, página 62 (Valverde, Jiménez, & Viza, 2006)

El nivel 0 de abertura (demostración) consiste en una validación práctica de los temas teóricos, de modo que el estudiante conoce con anterioridad el objetivo de cada práctica y el resultado final, facilitando al estudiante tanto el material como el método para el desarrollo.

El nivel 1 de abertura (ejercicio), el estudiante adquiere habilidades para seguir instrucciones de un método o instrumento y las técnicas de observación y manipulación, en estos dos primeros niveles las prácticas suelen ser expositivas.

El nivel 2 de abertura (investigación estructurada), el estudiante planea el método y escoge el material en el caso de que no esté completamente facilitado; este nivel emplea prácticas de investigación, sin embargo es posible que también se base en prácticas expositivas a las que se les ha eliminado parte del método.

En el nivel de abertura 3 (investigación abierta), el estudiante identifica y conoce el problema, planeando el método más adecuado para la solución con base en prácticas de investigación.

En el nivel de abertura 4 (proyecto), los estudiantes pueden o no proponer el objetivo de la práctica, además de seleccionar los materiales y diseñar el método a trabajar, en estas prácticas se realiza una investigación (Valverde et al., 2006).

1.1.3 Pautas para la elaboración de las prácticas

Para el diseño de una práctica de laboratorio es necesario considerar los siguientes aspectos (Alemán & Mata, 2006):

- Revisar el objetivo general y el contenido del tema
- Consultar al menos dos libros o artículos científicos acerca del problema planteado, los cuales se referenciarán en el manual de prácticas.
- Planificar el número pertinente de prácticas y de tiempo destinado dentro del curso para cada actividad.
- Seleccionar los apartados que describen la práctica (introducción, objetivo, referencias, instrucciones, métodos, materiales, preguntas, resultados, análisis y discusión.
- Planificar el tiempo necesario para las actividades de cada práctica contemplando un espacio para el análisis y conclusiones de los resultados

Para planificar el tiempo necesario para la realización de la práctica se deben tener en cuenta las diferentes actividades que la componen entre las que se encuentran:

Una actividad previa al experimento en donde se debe leer la guía antes de la práctica, una actividad experimental en la cual el profesor asiste pero no guía al estudiante, realizando una crítica constructiva y una observación directa del trabajo

individual del estudiante, una actividad post-experimentación en la cual se realiza el análisis, los resultados, las consultas y la elaboración de informes y por último, una actividad de evaluación donde el docente cualifica el trabajo desarrollado en la práctica y el informe (González, 2009; Valverde et al., 2006),(En & Nivel, 1996).

1.1.4 Documento guía

Este documento es fundamental en el modelo de la práctica ya que los estudiantes son aprendices y por lo tanto deben tener una guía de actividades que orienten su trabajo. Las pautas que orientan este documento no están del todo dichas si no que están encaminadas a las consideraciones de conocimiento o recursos que se pueden tener, esta guía es un texto a través del cual el profesor da una introducción al alumno del problema, recomienda caminos y plantea hipótesis, por lo general las guías experimentales cuentan con la siguiente estructura (Alemán & Mata, 2006; Emilia & Buitrago, 2013; En & Nivel, 1996; Valverde et al., 2006).

1. I.- Introducción
2. II.- Planteamiento del problema
3. III.- Fundamentación teórica
4. IV.- Metodología
5. V.- Procedimiento
6. VI.- Análisis de los resultados
7. VII.- Conclusiones
8. VII.- Actividades complementarias
9. IX.- Bibliografía

1.2 CONOCIMIENTO DEL PROCESO

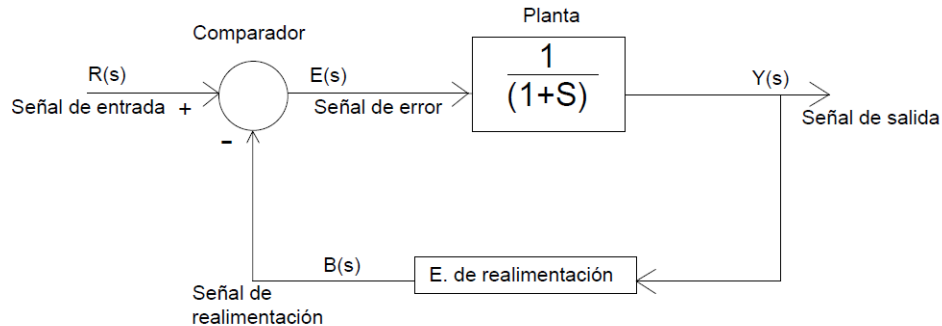
Con el fin de realizar prácticas de laboratorio en Sistemas Automáticos de Control lineal para el servomecanismo UV, es necesario definir el Sistema o los sistemas de Control del proceso a desarrollar en cada práctica dependiendo de su tecnología y configuración, para esto se requiere realizar primero un estudio general del proceso (servomecanismo) y segundo un reconocimiento del sistema; es decir, realizar un estudio detallado del funcionamiento del sistema, su estructura, componentes, y rangos de operación, además de adquirir habilidades para el manejo de la herramienta STARTER la cual permite configurar, parametrizar y poner en marcha el sistema, una vez completado lo anterior, se define el Sistema de Control a trabajar.

1.2.1 Servomecanismo

Es un dispositivo que se puede mover mecánicamente, al igual que los servosistemas involucra una serie de elementos de control y realimentación con los que busca controlar la salida del sistema, en este caso el movimiento que puede

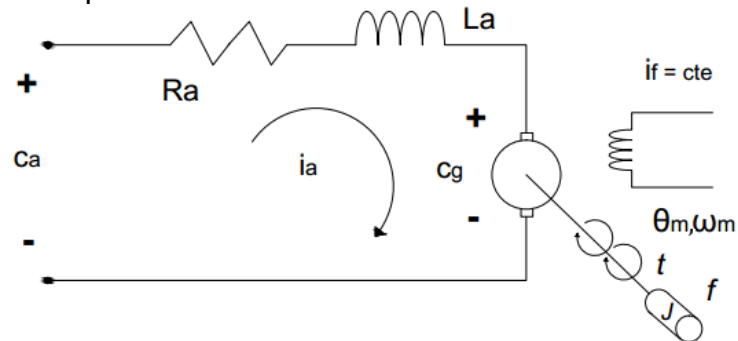
ser ejercido por lo general por motores de DC o de AC (Kuo, 1996) , la figura 1 representa un esquema básico de control de un servosistema.

Figura 1. Sistema básico de Control de un Servosistema



Los servomecanismos eléctricos, se accionan en su mayoría, por motores de corriente continua o por motores sincrónicos. Un motor de corriente continua (en inglés DC) es una máquina que convierte energía eléctrica en mecánica (ver figura 2), en estos motores de DC el par es proporcional al flujo de excitación y a la corriente de armadura aplicada al motor, estos motores se clasifican de acuerdo con su construcción como motores sin escobillas, con escobillas o de imán permanente; una aplicación común en servomecanismos de potencias pequeñas es utilizar los motores con imanes permanentes en donde se tiene un campo magnético constante creado por un imán y no por una bobina.

Figura 2. Circuito equivalente de un motor DC



Fuente: Figura 4-47. Modelo de un motor de cd excitado de forma separada, página 176 (Kuo, 1996)

1.2.2 Motor síncrono

Las maquinas síncronas son las máquinas de corriente alterna que se prefieren utilizar para los sistemas de control, debido a que las máquinas de inducción presentan asimetrías en los modelados por las características de construcción del rotor además, las maquinas síncronas de imanes permanentes son las máquinas eléctricas que permiten mayores servicios dinámicos para un mismo peso y volumen, estas máquinas tienen mejores características de respuesta de velocidad

y aceleración, ya que permiten trabajar a mayores rangos de operación (Konstenko & Piotrovski, 1973). El control más utilizado y más adecuado para estas máquinas es el control orientado al flujo del rotor directo, ya que basta con conocer los valores de corriente en dos de las fases y la posición del rotor, este control de flujo se describe como la técnica de control vectorial; los esquemas que se desarrollan en este método permiten tratar el motor síncrono CA de igual manera que el motor de DC de excitación separada. En las máquinas síncronas las expresiones generales de tensiones y corrientes implican las variables simétricas de las fases del estator (fase a, fase b, y fase c) e implican las variables asimétricas que componen el rotor (K_q , K_d , f_d), donde el subíndice q se emplea para el eje de cuadratura, d para el eje directo y f_d para el campo electromagnético (Levine, 1996).

La expresión general para las tensiones V_s que representa las fases del estator y V_r las del rotor son:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde V_s es el vector de los voltajes del estator, i_s es el vector de corrientes del estator, λ_s es el vector de enlazamientos de flujo del estator, V_r es el vector de las tensiones de rotor (cero para los devanados auxiliares), i_r es el vector de corrientes del rotor y λ_r es el vector de enlazamientos de flujo del rotor. Las resistencias del rotor y estator (R_s y R_r , respectivamente) son:

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad R_r = \begin{bmatrix} R_{kq} & 0 & 0 \\ 0 & R_{fd} & 0 \\ 0 & 0 & R_{kd} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde R_s es la resistencia del devanado del estator, R_{kd} es la resistencia del devanado del rotor por el eje directo y R_{kq} por el de cuadratura, y R_{fd} es la resistencia del devanado de campo, suponiendo que la máquina es simétrica magnéticamente se pueden encontrar los enlazamientos de flujo como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s(\theta) & L_m(\theta) \\ L_m(\theta)^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

$L_s(\theta)$ es la autoinductancia del estator y $L_m(\theta)$ es la autoinductancia mutua.

La dinámica del rotor se puede encontrar por medio de una ecuación diferencial para la velocidad $w(t)$.

$$J \frac{dw(t)}{dt} = T_e - Bw(t) - T_l \quad (4)$$

Donde el par eléctrico que se origina T_e puede determinarse a partir de las matrices de enlazamientos de flujo utilizando la expresión general:

$$T_e = -\frac{1}{2} \lambda^T \frac{d(\mathcal{L}^{-1}(\theta))}{d(\theta)} \lambda \quad (5)$$

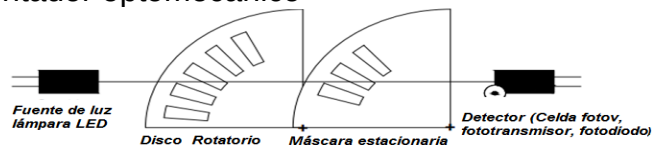
$\mathcal{L}^{-1}(\theta)$ Representa la matriz inversa de inductancia total y λ los enlazamientos de los vectores de flujo total

Un motor síncrono de imán saliente SPM o de imán permanente saliente se obtiene cuando el devanado del rotor se sustituye por imanes permanentes unidos a una superficie de un rotor liso, en este caso la $i_{fd} = \text{constante}$, $i_{kq} = i_{kd} = 0$, y $L_m = 0$. Un motor síncrono de imán interior IPM o de imán permanente interior se obtiene cuando el devanado del rotor se sustituye por imanes permanentes montados en el interior del rotor, en este caso la $i_{fd} = \text{constante}$, $i_{kq} = i_{kd} = 0$, y $L_m \neq 0$. Un motor síncrono de reluctancia se obtiene cuando el devanado de campo del rotor y los devanados auxiliares se retiran, y se prefiere tener un rotor con un núcleo magnético variable, en este caso la $i_{fd} = i_{kq} = i_{kd} = 0$, y $L_m \neq 0$.

1.2.3 Elementos de realimentación

Para la medición de los parámetros de velocidad angular y posición se emplean por lo general tres elementos: tacómetro, potenciómetro o un decodificador incremental (encóder). El codificador rotario incremental o encóder (ver figura 3) es un elemento de transducción empleado principalmente en las máquinas o herramientas de elaboración de materiales, en los robots, sistemas de motores y aparatos de medición y control. Los codificadores absolutos son los que producen una señal de código digital en su salida, los codificadores incrementales proveen un pulso por cada incremento de resolución pero sin hacer distinción en sus incrementos, estos son los más utilizados debido a su precio bajo y uso fácil. Se encuentran en el mercado dos tipos de codificadores, lineales y rotatorios; los encóders rotatorios están básicamente estructurados en cuatro partes, una fuente de luz, un disco rotatorio, una máscara estacionaria y un foto detector, este disco está compuesto por sectores opacos y transparentes que dejan pasar la luz de forma alterna, un par de estos sectores conforman un periodo incremental, la máscara permite pasar o no la luz dependiendo de la posición para ser percibida por el fotodiodo generando una onda de salida tipo triangular cuadrada o sinodal (Kuo, 1996).

Figura 3. Incrementador optomecánico



Fuente: Figura 4-37. Incrementadores optomecánicos típicos, página 169 (Kuo, 1996)

1.2.4 Variador de frecuencia

Actualmente en la industria muchos de los equipos actúan a velocidades variables, con lo cual se necesita un control adecuado de velocidad para alcanzar una buena productividad y garantizar la seguridad de los usuarios; para controlar la velocidad de un motor eléctrico, el método más rentable es utilizar un variador de frecuencia, puesto que no se requieren motores especiales, es más eficiente y los precios son más competitivos. Estos equipos generalmente se utilizan para control de par, de velocidad, mecánica delicada, movimientos complejos y regulación sin golpes mecánicos. Existen varias aplicaciones que se tienen en tipos diferentes de máquinas como: transportadoras, bombas y ventiladores centrífugos, bombas de desplazamiento positivo, ascensores y elevadores, extrusoras, centrífugas, prensas mecánicas y balancines (Mansilla, 2011) .

La estructura de un variador de frecuencia se compone de:

- Etapa rectificadora. Cambia la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.
- Etapa intermedia. Por medio de un filtro suaviza la tensión rectificada y reduce los armónicos.
- Etapa Inversora. Convierte tensión continua en tensión y frecuencia variable por medio de la generación de pulsos. Generalmente se usan IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistors) para generar los pulsos controlados de tensión. Los dispositivos modernos utilizan IGBT's inteligentes que tienen un microprocesador con protecciones por sobrecorriente, sobretensión, baja tensión, cortocircuitos, puesta a tierra, sobre temperaturas, etc.
- Etapa de control. Control de IGBT que genera los pulsos variables de tensión y frecuencia. También controla los parámetros externos. Los variadores más usados tienen modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) usando en la etapa rectificadora, puente de diodos rectificadores. Se usan condensadores y bobinas para disminuir armónicos y mejorar el factor de potencia.

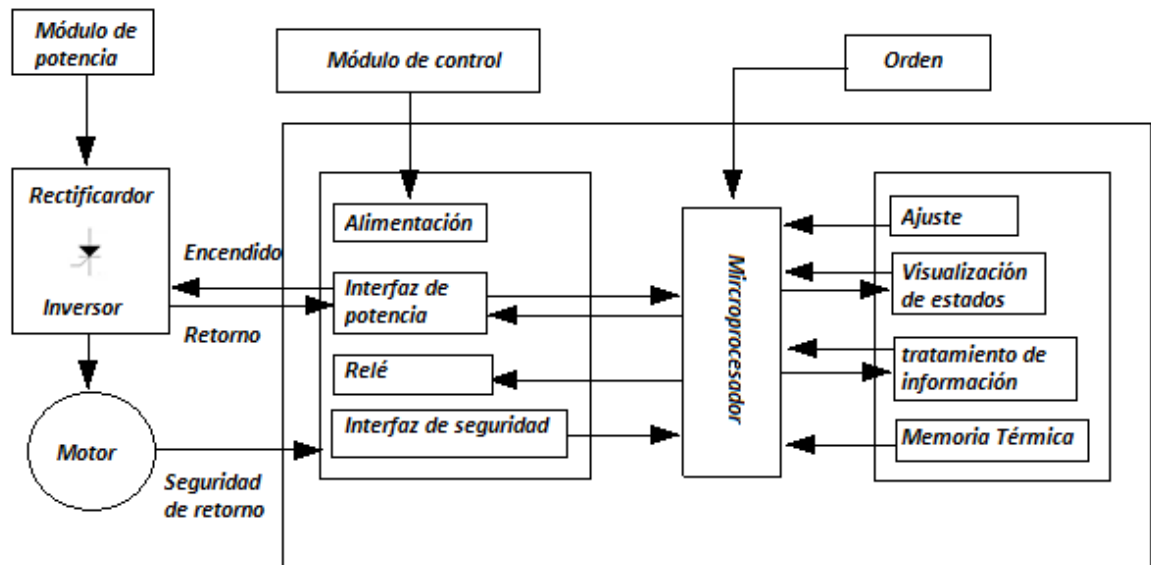
Los variadores se componen de dos módulos, módulo de control y módulo de potencia generalmente en una misma envolvente, ver figura 4.

- Módulo de control. Actualmente en los arrancadores y variadores, las funciones se controlan con microprocesador, gestionando la configuración, las órdenes transmitidas por un operador o unidad de proceso y los datos proporcionados por las medidas de velocidad, corriente, etc. Tanto los microprocesadores como los circuitos dedicados (ASIC) han permitido diseñar algoritmos de mando con prestaciones y reconocimiento de parámetros de la máquina controlada. Con esta información, el microprocesador gestiona las rampas de aceleración y desaceleración, control de la velocidad y limitación de corriente, proporcionando señales de

control de los componentes de potencia. Las protecciones y la seguridad se procesan por circuitos especializados (ASIC) o están integradas en los módulos de potencia (IPM), las tensiones necesarias para los circuitos de medida y de control se generan por alimentación integrada en el variador y separadas galvánicamente de la red.

- Módulo de potencia. Principalmente constituido por: componentes de potencia (diodos, tiristores, IGBT), interfaces de medida de las tensiones y/o corrientes, sistema de ventilación.

Figura 4. Variador de frecuencia



1.2.5 Filtros análogos

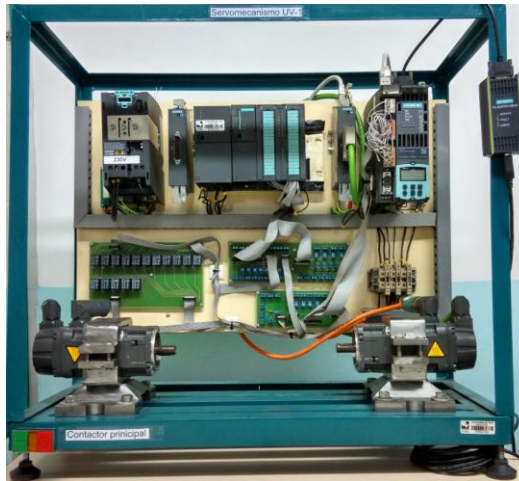
Los filtros análogos se utilizan para permitir el ingreso de señales especificadas en un rango de frecuencias, de acuerdo con su funcionamiento se clasifican en pasa bajo, pasa alto y pasa banda; los filtros paso bajo son los filtros que permiten pasar señales que estén por debajo de una frecuencia especificada, los filtros paso alto son los filtros que permiten pasar señales con frecuencia mayor que una especificada; y los filtros pasa banda dejan pasar señales por solo una banda de frecuencias especificadas. Estos filtros se clasifican también según los elementos que los constituyen como filtros activos y pasivos, los filtros activos se constituyen por resistencias, condensadores y amplificadores operacionales, se usan para operar frecuencias por debajo de 1MHz, tienen ganancia ajustable y son fáciles de ajustar, los filtros pasivos se usan generalmente para frecuencias mayores que 1MHz y se construyen principalmente con resistencias, condensadores y bobinas, son difíciles de sintonizar y no tienen ganancia; en la implementación de estos filtros no es posible obtener una respuesta ideal, por lo tanto existen varias aproximaciones para los filtros activos como el filtro Butterworth, la cual tiene una respuesta aproximadamente plana y cae 20 dB por década para cada orden del

filtro, o el filtro Chebyshev en donde la banda cae más rápido que la de un filtro Butterworth pero presenta un rizado en la banda.

1.2.6 Servomecanismo UV

El Servomecanismo UV o Banco de Servomecanismos UV (ver figura 5) es una plataforma industrial compuesta por elementos marca SIEMENS de características industriales, con el fin de controlar la variable de posición y velocidad de un motor de corriente alterna, este servosistema trabaja principalmente a través de la unidad de control del accionamiento o variador de velocidad Sinamics S110 el cual cuenta con un sistema integrado de posicionamiento básico ideal para tareas que exigen posicionar ejes de forma simple, rápida y precisa (Frecuencia y Velocidad, n.d.). Este equipo domina tanto la regulación de velocidad de servomotores síncronos como asíncronos, cubriendo un rango de potencia de 120 W (1 230 V CA) a 90 kW (3 AC 400 V). Además, se dispone para la comunicación entre el Sinamics S110 y el controlador (autómata) superior S7300, una interfaz analógica ± 10 V al igual que diversas interfaces de bus de campo como Profibus, CAN, PROFINET permitiendo flexibilidad y fácil integración en los entornos de sistema más diversos.

Figura 5. Servomecanismo UV



Algunas de las principales características son:

- Posicionamiento fácil con motores síncronos y los motores de inducción.
- Funciones integradas de seguridad.
- Puesta en marcha fácil con la placa de características electrónica en motores Drive Cliq y ARRANQUE.
- Mejoras en el regulador automático con ajuste automático.
- Conexión a un controlador de nivel mayor como un PLC mediante módulos estándar de comunicación y Totally Integrated Automation (TIA).

Estas características permiten que el Servomecanismo UV sea ideal para aplicaciones asociadas a sistemas de movimiento Automatizacion Simatic, permitiendo programar, parametrizar y poner en marcha el accionamiento sin interrupciones y con una única plataforma de ingeniería (Siemens, 2012).

Algunas aplicaciones son:

- Manipuladores
- Equipos de alimentación y toma de piezas
- Apiladores
- Máquinas de montaje automático
- Automatización de laboratorios
- Cambiadores de herramientas
- Ejes de reglaje y seguidores, por ejemplo : paneles fotovoltaicos

1.2.6.1 Componentes

Accionamiento Sinamics S110

El accionamiento eléctrico SINAMICS S110 (variador de frecuencia) es un dispositivo que se compone por dos módulos, un módulo de control CU320 y uno de potencia PM340 (SINAMICS S110, 2011) (ver figura 6).

Figura 6. Variador de velocidad Sinamics s110



Fuente: Página 2, (Siemens, 2009)

Módulo de potencia 340PM

El módulo de potencia es el módulo encargado de la fuerza del accionamiento, y este opera a través de las señales controladas en el módulo de control, este módulo de potencia está caracterizado de la siguiente manera:

- Rectificador de diodos del lado de red
- Condensadores electrolíticos del circuito intermedio con circuito de precarga
- Ondulador de salida

- Chopper de freno para resistencia de freno (externa)
- Alimentación de 24 V DC/1 A
- Etapa de mando, captaciones de valores reales

Los Power Modules cubren el rango de potencias de 0,12 kW a 90,0 kW y están disponibles en ejecuciones con o sin filtro de red, la figura 7 corresponde a la unidad de potencia del variador S110 PM 340 (SINAMICS S110, 2011).

Figura 7. Unidad de potencia PM340



Fuente: Tabla 3-1. Vista general de Power Modules PM340, página 53 (SINAMICS S110, 2011)

Unidad de control CU305 DP

La Control Unit CU305 DP (PROFIBUS) es el componente en el que se realizan las funciones de regulación y control del accionamiento, la figura 8 representa la unidad de control CU305 DP del variador de velocidad S110 (SINAMICS S110, 2011).

Figura 8. Unidad de control CU305



Fuente: Página 12, (Siemens, 2009)

La tabla 3 contiene las diferentes interfaces que posee la unidad de control CU305 DP.

Tabla 3. Sinopsis de interfaces de la CU305 DP

Tipo	CU305 DP
Entradas/ salidas digitales	4
Entradas digitales con aislamiento galvánico	5
Entradas digitales de seguridad	3
Entrada analógica	1
Salida digital de seguridad (F-DI)	1
Salida digital de seguridad (F-DO)	1
Interfaces DRIVE-CLIQ	1
Interfaces CAN	--
Interfaces serie (RS232)	1
Power Module Interface (PM-IF)	1
Interfaz encóder (HTL/TTL/SSI)	1
Entrada para sensor de temperatura del motor	1
Alimentación de electrónica de control 24v	1
Hembrillas de medida	2
Interfaz para BOP	1

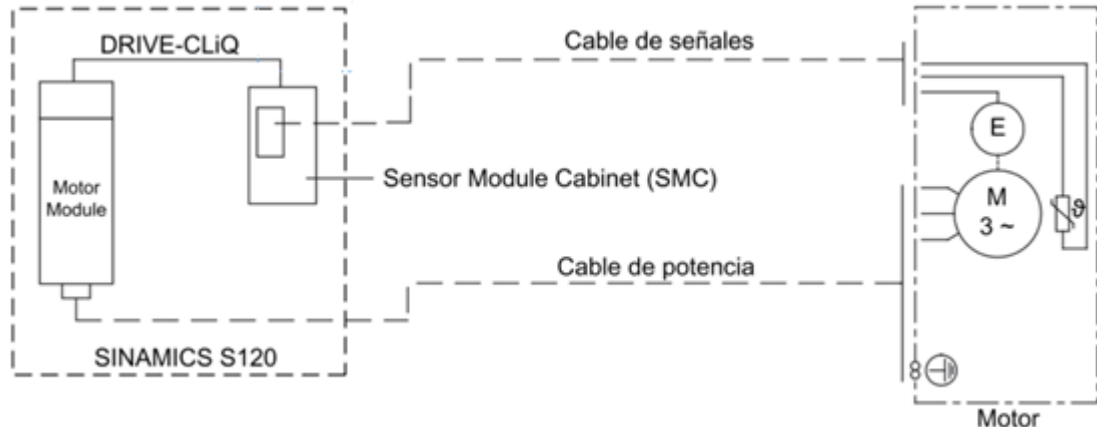
Fuente: Tabla 6-1. Número de interfaces CU305 PN/CU305 DP/CU305 CAN, página 151 (SINAMICS S110, 2011)

NOTA: Si no se utiliza la función Safety de la Control Unit, pueden utilizarse las entradas digitales de seguridad como 6 entradas digitales con aislamiento galvánico adicionales, y utilizarse la salida digital de seguridad como 1 salida digital con aislamiento galvánico adicional.

Acondicionador de señal SMC20

El sensor módulo Cabinet-Mounted procesa las señales que vienen del encóder y envía a la unidad de control la información vía DRIVE-CLIQ por ejemplo información sobre velocidad, posición real y dado el caso la temperatura del motor, la figura 9 muestra la conexión del captador a través de un Sensor Module Cabinet (Siemens, 2011b).

Figura 9. Conexión del captador a través de un Sensor Module Cabinet



Fuente: Figura 6-6 Conexión de encóder sin DRIVE-CLiQ, página 38 (Siemens, 2011b)

Este módulo se utiliza para evaluar señales de los encóders incrementales con señales senos de 1Vpp o de encóders absolutos con eNDat 2.1 o ss1; cuando los motores no tienen comunicación DRIVE CLiQ es necesario utilizar un acondicionador de señal SMC20 como se ve en la figura 10.

Figura 10. Sensor Module Cabinet SMC20



Fuente: Página 28 (Siemens, 2009)

Tecnología DRIVE-CLiQ

Esta tecnología es una interfaz que permite la comunicación entre varios elementos del accionamiento como es la conexión entre una unidad de control y una o varias unidades de potencia, además permite adquirir los datos provenientes del encóder dependiendo de la tecnología de construcción del motor.

Motores con DRIVE-CLiQ

Los motores con interfaz DRIVE-CLiQ se tienen que conectar directamente a través de los cables MOTION-CONNECT DRIVE-CLiQ disponibles al módulo de motor

correspondiente. La conexión del cable MOTION-CONNECT DRIVE-CLiQ- en el motor se ejecuta según el tipo de protección IP67. La interfaz DRIVE-CLiQ alimenta el captador de motor a través de la alimentación integrada de 24 V DC y transmite las señales de captador de motor y de temperatura, así como los datos electrónicos de la placa de características.

Motores sin DRIVE CLIQ

Los motores sin DRIVE-CLiQ necesitan para el funcionamiento en SINAMICS S110 un módulo de sensor "Cabinet-mounted". Los módulos de sensor evalúan las señales de los captadores de motor conectados o los captadores externos y las convierten a DRIVE-CLiQ. En combinación con captadores de motor se puede evaluar adicionalmente la temperatura del motor mediante módulos de sensor. Más información en el Manual SINAMICS.

Motor síncrono 1FK7

Es un motor muy compacto excitado por imanes permanentes, estos motores tiene la ventaja de adaptarse de manera adecuada a cualquier aplicación empleando los diversos componentes opcionales como reductores, captadores y encoders disponibles (sistemas integrados para regulación de velocidad y posición) (Siemens, 2011b) asociados a los variadores SINAMICS S120 componen un potente sistema con alta funcionalidad y alta capacidad de sobre carga, ver figura 11.

Campo de aplicación

- Máquinas herramienta
- Robots y sistemas de manipulación
- Transformación de madera, vidrio, cerámica y piedras
- Máquinas de embalaje, de transformación de plásticos y textiles
- Ejes auxiliares

Figura 11. Motor síncrono 1FK7



Fuente: Página 29 (Siemens, 2009)

La serie de motores síncronos 1FK7 contienen sistemas incorporados de encóders con o sin interfaz DRIVE-CLiQ, entre estos sistemas se pueden encontrar:

- Encóder incremental sen/cos 1 VPP 2048 S/R
- Encóder absoluto multivuelta 1VPP
- 2048 S/R en 1FK704 a 1FK710
- 512 S/R en 1FK702 a 1FK703 y rango de desplazamiento 4096 R (vueltas) con interfaz EnDat

Adaptador Simatic PC USB A2

Este adaptador permite la conexión de ordenadores portátiles o PC mediante puerto USB para controladores Simatics S7, esta conexión puede ser establecida mediante comunicación MPI (Multi Point Interface) o puerto Profibus de los sistemas Simatic S7 ver figura 12 (Siemens, 2013).

Figura 12. Adaptador Simatic PC USB A2



Fuente: Página 11 (Siemens, 2013)

PLC SIMATIC S7-300

SIMATIC S7-300 es el controlador más empleado en la plataforma “Totally Integrated Automation”, contando con diversas aplicaciones de carácter exitoso en los diferentes sectores industriales como la industria del automóvil, la maquinaria en general, las industrias de procesos y transformación de plásticos entre muchos más, (ver figura 13).

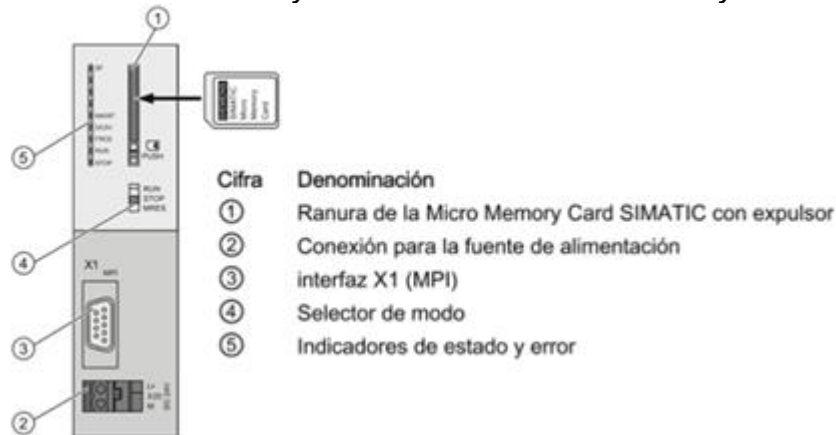
Figura 13. PLC SIMATIC S7-300



Fuente: Pagina web (Siemens, 2011a)

Este controlador se compone de módulos, es decir que se conforma a partir de un módulo de potencia, uno de control y otro de entradas y salidas, permitiendo modificar la estructura del controlador continuamente adaptándose a innovaciones continuas, especialmente en la unidad de control o CPU; esta CPU compacta 314C-2PN/DP compatible con PROFINET, es totalmente nueva, con una memoria de 192 Kbytes, 0,06 microsegundos por operación de bits y las conocidas funciones tecnológicas y E/S integradas. A partir de la versión 3.2, las CPU PN poseen todas las funciones nuevas PROFINET,(Siemens, n.d.).

Figura 14. Elementos de mando y señalización de la CPU 312 y CPU 314



Fuente: Página 52 (Siemens, n.d.)

1.2.6.2 Funcionamiento principal

El funcionamiento principal de este servosistema o accionamiento es controlar la velocidad y la posición de motores de corriente alterna, el motor se acciona por medio del variador SINAMICS S110, el cual se compone de una unidad de control y una de potencia. Con el fin de controlar la velocidad del motor la unidad de control emplea una técnica de control vectorial o control de campo orientado, permitiendo controlar la velocidad de un motor de corriente alterna como un motor de corriente continua (servorregulación).

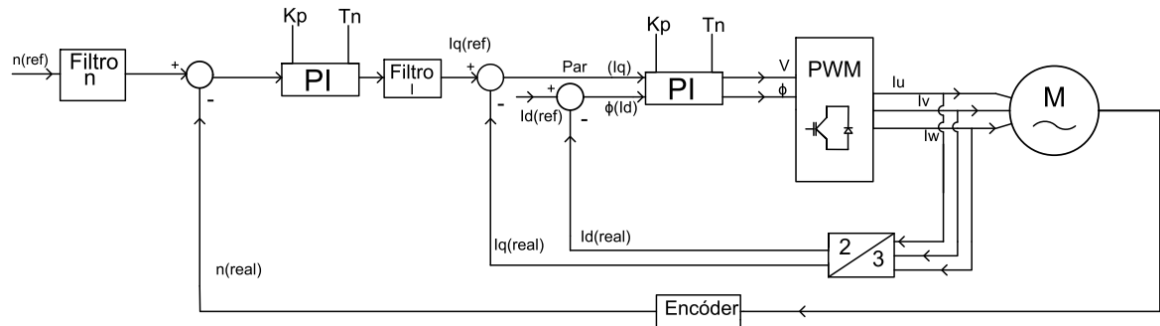
La técnica de control vectorial busca relacionar la corriente de alimentación de un motor de corriente alterna con la corriente de armadura y de campo de un motor de corriente continua por medio de una transformación vectorial de la corriente trifásica de alimentación de las fases i_a , i_b , i_c desfasadas cada una en 120° , en la corriente por el eje de cuadratura i_q y por el eje directo i_d desfasadas en 90° .

A partir de esta relación y considerando que la corriente por el eje de cuadratura refleja la potencia activa y la corriente por el eje directo refleja la potencia reactiva de la máquina, es posible controlar la velocidad de un motor de corriente alterna de

forma análoga a como se controla la velocidad de un motor de corriente continua, teniendo en cuenta que la potencia activa es proporcional a la corriente de armadura y la potencia reactiva es proporcional a la corriente de campo (ver sección 1.2.2 Motor síncrono Servomecanismo) .

El diagrama de bloques del sistema de control que describe la servorregulación empleada por SIEMENS en el accionamiento se ilustra en la figura 15.

Figura 15. Servorregulación de velocidad

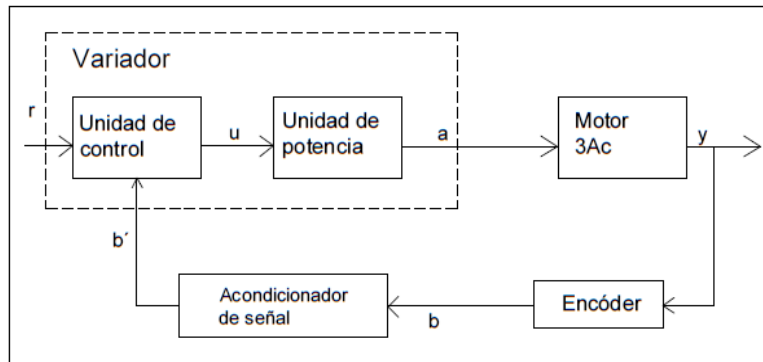


El controlador utilizado para el lazo de velocidad y de corriente del sistema es un controlador Proporcional Integral PI, por lo general al lazo de control de velocidad se le adiciona un lazo de control interno de corriente con el fin de mejorar la dinámica y el error estacionario del proceso, el servomecanismo utiliza un inversor trifásico PWM que recibe la señal de control del controlador PI con el fin de variar la velocidad del motor a partir de la frecuencia y la tensión de alimentación.

1.2.6.3 Estructura del sistema de control

La estructura general del sistema de control del Servomecanismo UV permite comprender la bucla típica de realimentación y operación básica empleada del accionamiento, en donde el objetivo principal es controlar algunas variables de la planta o motor de corriente alterna, de tal forma que se mide la señal de la planta (en este caso el motor 1FK7) a través de un encóder interno del motor, acondicionando la señal a través de un SMC20 para comparar la señal a controlar con la señal de referencia en la unidad de control CU305, en donde se aplica una técnica de control y se ordena al actuador (en este caso la unidad de potencia PM340) modificar los parámetros de entrada de la planta o motor, el Servomecanismo UV a partir del variador Sinamics S110 puede controlar diferentes variables del motor síncrono 1FK7 como por ejemplo par, velocidad y posición, ver figura 16.

Figura 16. Estructura del sistema de control del Servomecanismo UV



Los elementos que componen la bucla típica de realimentación se definen de la siguiente manera.

Planta:	Motor síncrono 1FK7 -230V
Elementos de realimentación:	Encóder Incremental y acondicionador de señal SMC20
Controlador:	Unidad de control CU305
Actuador:	Unidad de potencia PM340

Nota: Es posible accionar el sistema desde un controlador superior como un PLC S7300 por medio de una comunicación PROFIBUS o acondicionamiento de señales con la unidad de control CU305.

Las señales de control se definen de la siguiente manera:

- r*:** Señal de referencia (velocidad, posición)
- u*:** Señal de control: Señal enviada desde el controlador hasta el actuador (señal de salida del controlador PI)
- a*:** Señal actuante: señal enviada desde la unidad de potencia hacia el motor (corriente trifásica del inducido)
- b*:** Señal de realimentación (encóder)
- b'*:** Señal de realimentación (SMC20)
- y*:** Señal de salida o controlada (Velocidad, posición).

1.2.6.4 Rangos y límites de operación del sistema

Motor 1FK7:
Tensión 3Ø 230V AC
Velocidad máxima: 10000 rpm

Par máximo: 4.5 Nm
Corriente máxima: 7A

Módulo de potencia PM 340:

Tensión red 1Ø 200-240V AC o tensión 3Ø 380-480V AC
Frecuencia de red: 43...63Hz
Frecuencia de salida: 0...300Hz
Intensidad máxima de salida: 4.6 A

Unidad de control CU305:

Alimentación electrónica:
Tensión máxima: 20.40V a 28.8 V
Corriente consumo máxima: 0.8 A sin DRIVE CLIQ 0.35A
Corriente máxima por el conector: 20A

Unidad de acondicionamiento SMC20:

Alimentación electrónica:
Tensión máxima: 20.40V a 28.8 V
Corriente consumo máxima: 0.35A
Corriente máxima por el conector: 20A

Encoder 2048 S/R 1 1Vpp:

Tension: 4.5V a 5 V
Corriente max: 150 mA

PLC S7300:

Tensión red 1Ø 85-132V AC o tensión 3Ø 170-264V AC
Rango de frecuencia: 47Hz a 63Hz
Corriente máxima red: 20A
Tensión de salida: 23.27V a 24.72 V
Corriente de salida: 0 a 5A

1.2.6.5 Manejo del software STARTER

La puesta en marcha del Servomecanismo UV utiliza como herramienta computacional o plataforma el programa STARTER, el cual permite configurar y parametrizar los diferentes componentes del Servomecanismo UV en la unidad de control CU305 del accionamiento SINAMICS S110, este accionamiento permite controlar dos variables básicas en el motor síncrono 1KF7, la regulación de velocidad y regulación de par (Siemens, 2010). La regulación empleada para el análisis de los Sistemas de Control Lineal de este proceso es la velocidad, ya que permite una configuración, parametrización y puesta en marcha de forma directa. Cabe resaltar que la regulación de velocidad para este accionamiento se puede hacer por dos formas; la primera es la regulación de velocidad sin encóder la cual tiene una retroalimentación calculada por medio de un modelo interno del motor, y

la segunda es la regulación de velocidad con encóder la cual utiliza los datos obtenidos por medio del encóder como realimentación, las prácticas de laboratorio se basarán en la regulación de velocidad con encóder.

La regulación de posición es activada por medio del módulo de función posicionador simple, esta regulación sólo es habilitada con la etapa de regulación de velocidad con encóder, utilizando los datos obtenidos por el encóder y el acondicionador de señal como realimentación.

Nota: El Servomecanismo UV presenta restricciones de operación, configuración y parametrización, por lo que no es posible modificar los lazos de control del accionamiento imposibilitando trabajar directamente con el lazo abierto de control de velocidad.

1.3 CONCEPTOS EN FORMACIÓN EN SISTEMAS DE CONTROL LINEAL

Un curso de formación en Sistemas de Control Lineal, generalmente tiene como objetivos desarrollar competencias en análisis y ajuste de controladores lineales; dependiendo del número de horas disponibles estos cursos pueden abarcar problemas de diseño, los análisis y diseños se pueden desarrollar en los dominios de respuesta temporal del sistema o de frecuencia compleja.

En el dominio temporal del sistema es de interés analizar la respuesta en el tiempo la cual está conformada por la respuesta permanente que ocurre cuando el tiempo tiende a infinito y la transitoria que ocurre de pasar del estado inicial al estado estacionario. La respuesta permanente de un sistema de control define la exactitud con la cual la salida del sistema sigue la señal de prueba, caracterizando la respuesta en término del error de estado estacionario (Ogata, 2003), el análisis transitorio busca a partir de la respuesta temporal del sistema identificar un modelo en el dominio de la variable compleja S que permita describir los parámetros dinámicos del sistema, dependiendo del tipo de orden del sistema existe una representación matemática, entre algunos tipos de sistemas se pueden encontrar sistemas de primero y segundo orden (Ramírez, 2014) o sistemas de orden superior (Smith & Corripio, 1997).

Las técnicas de identificación de procesos son métodos que permiten describir el proceso dinámicamente a partir de la respuesta transitoria del sistema ante señales conocidas de prueba. Existen diferentes técnicas de identificación experimental las cuales dependen del sistema a analizar, en las técnicas de lazo abierto el controlador aún no se ha instalado y si lo esta debe estar operando en modo “manual” durante la prueba (Alfaro, 2001), en las técnicas de lazo cerrado el controlador se encuentra operando en modo “automático” es decir no se puede excitar directamente el proceso (Ruíz, 2011).

Un tema muy importante para el análisis y diseño de sistemas de control es el estudio de las características dinámicas del sistema, las cuales se determinan a partir de una función de transferencia compuesta por polos y ceros ubicadas en el plano complejo, estas comprenden estudios de sensibilidad a variación paramétrica, análisis de error, estabilidad absoluta y estabilidad relativa (Ogata, 2003).

El estudio de la respuesta en frecuencia de un sistema hace referencia a la respuesta de un sistema en estado estacionario ante una entrada senoidal, en este se busca analizar características de los sistemas como velocidad de respuesta, ancho de banda, rechazo a ruidos, frecuencia de resonancia, pico máximo de resonancia, respuesta permanente y estabilidad, una ventaja del método de la respuesta en frecuencia es que utiliza los datos medidos para realizar el diseño de Control del Sistema sin la necesidad de obtener su modelo matemático (Kuo, 1996; Ogata, 2003).

Un aspecto fundamental en el desarrollo de un Sistema de Control de un proceso, es definir o reconocer el controlador a emplear con el fin de obtener el rendimiento deseado del sistema. Para definir este controlador se necesita conocer su principio de funcionamiento y el efecto que tiene en la respuesta del sistema, además de conocer diferentes métodos que permitan encontrar los valores de sus parámetros. Existen diferentes métodos que permiten determinar los valores de los parámetros de un controlador, algunos métodos son empíricos y otros de diseño, Los métodos empíricos se emplean para sintonizar o ajustar los controladores de un sistema pero tienen la desventaja de no poder especificar rendimientos deseados, entre estos métodos se encuentran los métodos de sintonía mediante la curva de reacción de Ziegler-Nichols (Ramirez, 2014), los métodos de diseño permiten a partir de las especificaciones de funcionamiento proponer el controlador adecuado, entre estos métodos se encuentra el diseño mediante el lugar geométrico de las raíces (Ogata, 2003; Ram, Emilio, Garc, & Valle, 2008). Todos estos temas se deben impartir en los cursos teóricos y prácticos dentro de la formación en Sistemas de Control Lineal, la literatura hoy en día es muy amplia lo que permite a profesores y estudiantes abarcar los temas sin dificultad.

2 DISEÑO METODOLÓGICO

Considerando que la plataforma de experimentación o Servomecanismo UV es un subproducto del proyecto “Entorno de aprendizaje basado en proyectos para sistemas de control” (Ramírez Scarpetta et al., 2011) orientado a metodologías de aprendizaje activo, la estrategia de desarrollo y aprendizaje empleada en este trabajo de grado (el cual tiene como objetivo construir guías de laboratorio de Sistemas Automáticos de Control Lineal) es una metodología de aprendizaje activo. El marco teórico, los materiales, el procedimiento, los resultados y las conclusiones que caracterizan su desarrollo se definen a partir de la identificación del problema y de la solución (objetivos).

Para cumplir con el objetivo general de este trabajo, el cual busca construir las guías de Laboratorio para Sistemas de Control Lineal utilizando el servomecanismo UV, se procedió a cumplir con cada uno de los objetivos específicos. Para solucionar el primer objetivo específico el cual busca “estudiar a profundidad la estructuración y operación del Banco de Servomecanismos UV”, se procede con un conocimiento del proceso en el cual se hizo una consulta general de las diferentes características que componen un servomecanismo y su funcionamiento, además de realizar el reconocimiento de la plataforma (Servomecanismo UV).

Para cumplir con el segundo objetivo específico el cual trata de especificar la estructura de las guías y las prácticas de laboratorio a diseñar, se procede considerando el funcionamiento y la tecnología de la plataforma, las características a tener en cuenta en el diseño de prácticas experimentales y los conceptos a desarrollar en las prácticas de laboratorio de Sistemas de control Lineal. Una vez definidos y analizados los temas necesarios para el desarrollo de las prácticas experimentales en sistemas de control Lineal empleando el Servomecanismo UV, se tiene como resultado la definición de la metodología o la estrategia de aprendizaje a implementar en estas guías, lo que permitió definir su estructura y como resultado el listado de las prácticas a desarrollar.

Posteriormente, cumplido los dos primeros objetivos, se procedió a especificar el contenido de cada práctica diseñada, en este contenido se especificaron los objetivos, los materiales, el marco teórico y el procedimiento con el fin de cumplir con el tercer objetivo. Para cumplir los objetivos cuarto y quinto, los objetivos se diseñaron a partir de las especificaciones y la definición de la estructura, las prácticas de laboratorio de Sistemas de Control utilizando el Servomecanismo UV y se redactó un manual de operación del servomecanismo UV. Para verificar estos diseños se propuso un método de validación, en este método se definieron unos grupos pequeños de estudiantes para desarrollar las prácticas de experimentación y se realizó una encuesta para discutir los resultados. Finalmente se presentaron las conclusiones del trabajo desarrollado en el cual se discuten los diferentes factores a tener en cuenta en diseño de las prácticas de experimentación para

Sistemas Automáticos de Control Lineal del Servomecanismo UV, se discuten los resultados obtenidos de la validación de estas prácticas y se proponen trabajos futuros que permitan complementar el trabajo.

3 RESULTADOS

El objetivo principal de este proyecto es la elaboración de las guías de laboratorio de Sistemas de Control Lineal utilizando el Servomecanismo UV. Para este propósito las guías deben permitir estudiar, analizar y diseñar el sistema de control de velocidad que compone este servomecanismo, y que el estudiante adquiera habilidades en la configuración, parametrización, puesta en marcha y medición del sistema.

Para cumplir con el objetivo general, se consideraron los diferentes escenarios que influyen en el diseño de instrucción de una práctica experimental, como la metodología de aprendizaje o la estrategia pedagógica, los métodos empleados en el desarrollo experimental, las herramientas tecnológicas y su principio de funcionamiento.

A partir de la identificación de los escenarios expuestos en el capítulo anterior para el caso específico de esta plataforma industrial, se obtuvieron una serie de resultados que contienen los ítems necesarios para definir y diseñar las prácticas experimentales para el laboratorio de sistemas de control Lineal empleando el Servomecanismo UV, estos resultados se exponen en este capítulo.

Además, el estudiar la plataforma y la herramienta computacional STARTER tuvo como resultado un manual de operación para el control de velocidad y de posición del Servomecanismo UV utilizando STARTER el cual permite poner en marcha, medir y extraer datos, con el fin de guiar al estudiante en las pruebas necesarias en la plataforma para estas prácticas experimentales, este manual se encuentra en los anexos de este trabajo de grado (ver Anexo B).

3.1 DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología empleada en el aprendizaje experimental de estas prácticas, se definió tomando como referencia los niveles de abertura utilizados para identificar el nivel cognitivo requerido en prácticas experimentales. Para definir este nivel de abertura se tomó como referencia las prácticas realizadas con los Servomotores anteriores (Díaz Paz, 2015a, 2015b, 2015c; Plazas, 2014a, 2014b; Universidad del Valle, 2012, 2014), y el estudio del sistema empleado o accionamiento (Servomecanismo UV), en el cual dependiendo de la tecnología del Servosistema, se estableció el listado de prácticas realizadas y los métodos experimentales empleados.

El nivel de abertura requerido para estas prácticas es de 1 (ver tabla 2) considerando que el propósito de cada práctica o el objetivo, los procedimientos y los materiales están dados, guiando al estudiante en las instrucciones de un método o de un procedimiento y las técnicas específicas de observación y manipulación

para finalmente realizar el análisis de los resultados y conclusiones (Valverde et al., 2006).

Además de definir la metodología, se considera de igual importancia la planificación del tiempo necesario para cada práctica, para esta planificación se tiene en cuenta las diferentes actividades que la componen, entre las cuales se encuentran una actividad pre-experimental en la cual se propone temas a consultar y actividades a realizar con el fin de introducir al estudiante a la práctica, una actividad experimental en la cual se desarrolla el procedimiento propuesto en cada guía, una actividad de post-experimentación en donde se realiza el análisis, los resultados y la elaboración del informe por parte del estudiante y una actividad de evaluación donde se valora el aprendizaje y los resultados de cada práctica realizada. Considerando lo anterior y el cronograma académico que se dispone en la Universidad del Valle, se define un tiempo de 15 días entre cada práctica con el fin de que el estudiante tenga tiempo para realizar las cuatro actividades que componen una práctica.

3.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

Para diseñar la estructura de las prácticas de laboratorio se tomaron en cuenta varios ejemplos de guías implementadas en prácticas experimentales (Alemán & Mata, 2006; Emilia & Buitrago, 2013; En & Nivel, 1996; Valverde et al., 2006), así como las guías de laboratorio de control para los servomecanismos anteriores (Díaz Paz, 2015a, 2015b, 2015c; Plazas, 2014a, 2014b; Universidad del Valle, 2012, 2014), y guías de prácticas para los Laboratorios de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle (EIEE, n.d.; Electronica, n.d.; “Laboratorio 1 características básicas del amplificador operacional,” 2013, “Medición de la potencia trifásica y El factor de potencia,” n.d.; Universidad del Valle, n.d.; Universidad del Valle, n.d.), a partir del nivel 1 de abertura definido, la estructura de las guías debe ser de forma que el objetivo, los materiales y el procedimiento estén definidos por las prácticas, pero el análisis y conclusiones por los estudiantes.

Para este diseño se propone una estructura con el fin de exponer los diferentes factores en el desarrollo y aprendizaje experimental, y exponer con detalle la especificación individual en cada práctica, la estructura se expone a partir de una figura y su descripción, En la figura 17 se expone la página de presentación de la estructura diseñada.

Figura 17. Página de presentación de estructura



En la figura 18 se muestra el contenido o el índice propuesto para la estructura de las prácticas.

Figura 18. Contenido del diseño de la estructura

Grupo de Investigación en Control Industrial -GICI-		Universidad del Valle
CONTENIDO		
CONTENIDO		2
INTRODUCCIÓN		3
METODOLOGÍA		3
EVALUACIÓN		3
1 PRÁCTICA X: TÍTULO DE LA PRÁCTICA.....		4
1.1 Introducción.....		5
1.2 Objetivos específicos		5
1.3 Marco teórico		5
1.4 Procedimiento		5
1.5 Informe		5
BIBLIOGRAFIA		6



La figura 19 muestra los siguientes ítems del diseño: una introducción del cuaderno o cuadernillo en la busca relacionar al usuario (estudiante) con las prácticas experimentales expuestas, en el cual se indica el tema o concepto a estudiar, una metodología que describe la estrategia de aprendizaje empleada en la realización de las prácticas, con el fin de preparar e informar al estudiante las diferentes etapas que componen una práctica, una evaluación que describe la metodología de evaluación y se propone un porcentaje de valoración para las diferentes etapas que componen la práctica (preinforme, práctica, informe), una nomenclatura donde se exponen algunos de los términos (definiciones) y abreviaturas que se emplean.

Figura 19. Diseño de estructura (introducción, metodología, evaluación nomenclatura)



La figura 20 muestra los siguientes ítems del diseño: el título de cada práctica a desarrollar, el objetivo principal en donde se expone la competencia a alcanzar en el proceso de aprendizaje de cada práctica, con el fin de relacionar directamente al estudiante con el tema a estudiar, los materiales donde se realiza una lista con la referencia, la cantidad de los equipos y los materiales utilizados en el desarrollo de la práctica, el tiempo propuesto para cada trabajo (trabajo presencial en el aula, trabajo en el laboratorio, trabajo independiente, visitas), los prerrequisitos en donde se especifican los conocimientos previos y habilidades necesarias para desarrollar

de forma exitosa cada práctica, y el preinforme en donde el estudiante debe realizar diferentes actividades de consulta e investigación con el fin de familiarizarse con la práctica experimental, además de exigir una lectura de la práctica de laboratorio antes de iniciarla con el propósito de tener claros los objetivos, materiales, marco teórico y procedimiento.

Figura 20. Diseño de estructura (objetivos, materiales, tiempo, prerequisites y preinforme)

Grupo de Investigación en Control Industrial -GICI-
Universidad del Valle

1 PRÁCTICA X: TÍTULO DE LA PRÁCTICA

Objetivo
Expone la competencia o el objetivo principal a alcanzar en el proceso de aprendizaje de cada práctica, con el fin de relacionar directamente al estudiante con el tema a estudiar.

Materiales
Se realiza una lista con la referencia, la cantidad de los equipos y los materiales utilizados en el desarrollo de la práctica.

Tiempo
Propone los tiempos requeridos para cada trabajo (trabajo presencial en el aula, trabajo en el laboratorio, trabajo independiente, visitas)

Prerrequisitos
Expone los requisitos previos de conocimientos y de habilidades necesarios para desarrollar de forma exitosa práctica

Preinforme
En el preinforme el estudiante debe realizar diferentes actividades de consulta e investigación con el fin de familiarizarse con la práctica experimental, además de exigir una lectura de la práctica de laboratorio antes de iniciarla con el propósito de tener claros los objetivos, materiales, marco teórico y procedimiento.

La figura 21 muestra los siguientes ítems del diseño: una introducción de cada práctica en donde se busca relacionar al estudiante con el tema estudiado, dando una breve explicación del contenido del tema, los objetivos específicos en donde se describen los objetivos a desarrollar en el proceso experimental y analítico con el

fin de cumplir el objetivo general, un marco teórico en donde se especifican de forma detallada los temas estudiados en la realización de la práctica, con el fin de preparar al lector con el conocimiento necesario para un desarrollo exitoso del tema, un procedimiento en donde se especifica de forma de detalla cómo se debe realizar la práctica con el fin de crear conductas que permitan alcanzar los objetivos propuestos, buscando orientar de forma correcta al estudiante en los análisis y conclusiones a desarrollar, un informe en donde se propone la estructura del trabajo escrito a presentar y la bibliografía.

Figura 21. Diseño de estructura (introducción, objetivos específicos, marco teórico, procedimiento, informe y bibliografía)

1.1 Introducción

En la introducción se busca relacionar al estudiante con el tema estudiado en la práctica, dando una breve explicación del contenido del tema.

1.2 Objetivos específicos

Se describen los objetivos a desarrollar en el proceso experimental y analítico con el fin de cumplir el objetivo general.

1.3 Marco teórico

En el marco teórico se especifica de forma detallada los temas estudiados en la realización de la práctica, con el fin de preparar al lector con el conocimiento necesario para un desarrollo exitoso del tema.

1.4 Procedimiento

En el procedimiento se especifica de forma de detalla cómo se debe realizar la practica con el fin de crear conductas que permitan alcanzar los objetivos propuestos, buscando orientar de forma correcta al estudiante en los análisis y conclusiones a desarrollar.

1.5 Informe

Cada grupo debe entregar por escrito el INFORME que estará estructurado de la siguiente manera:

1. Desarrollo de la practica

1.1 Ejercicio

- Desarrollo
- Mediciones
- Validación (datos experimentales vs modelo)

2. Análisis estadístico de los modelos obtenidos

3. Conclusiones

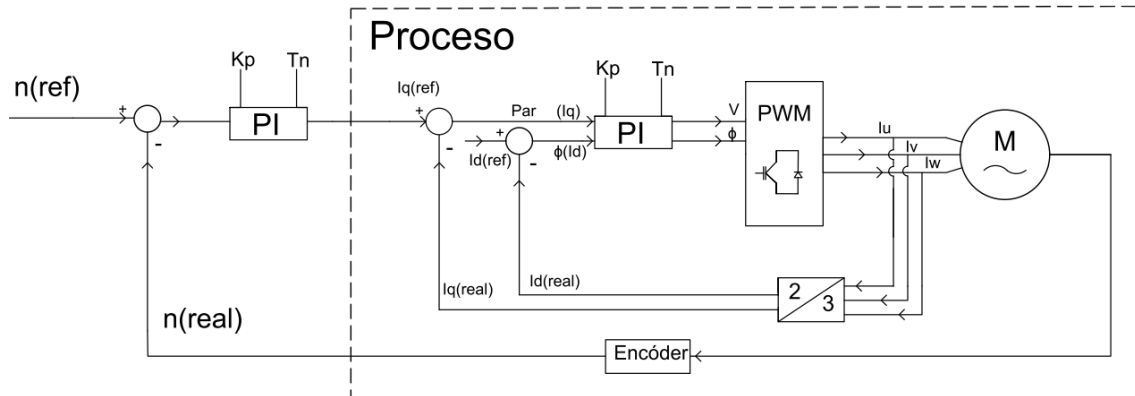
BIBLIOGRAFIA

APELLIDO, Nombre, Título y año de publicación.

3.3 SISTEMA DE CONTROL A TRABAJAR

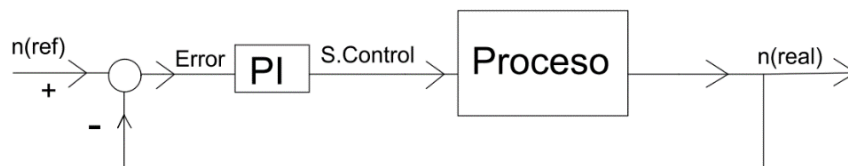
A partir del principio de funcionamiento del sistema, la estructura y los componentes del sistema de control del servomecanismo empleado por Siemens, se define el sistema de control de velocidad a trabajar para las prácticas experimentales con el fin de cumplir con los objetivos planteados en las prácticas de control lineal. Considerando que el sistema presenta restricciones de operación, configuración y parametrización, no se pueden modificar los lazos de control del accionamiento imposibilitando trabajar directamente con el lazo abierto de control de velocidad. Por lo tanto, el sistema de control a trabajar para el control de velocidad del sistema será el que se compone a partir del lazo de regulación de velocidad del servomecanismo el cual emplea un controlador PI (ver figura 22).

Figura 22. Lazo de control PI equivalente para el Control de velocidad



Donde, la velocidad es la variable a controlar por medio de un lazo de control (PI), la planta o el proceso es el motor con el lazo de regulación de corriente y la dinámica del inversor y el lazo de realimentación tiene ganancia unitaria. La figura 23 representa el sistema de control equivalente a trabajar.

Figura 23. Sistema de control PI de velocidad del Servomecanismo UV



Nota: Se pueden modificar los parámetros del controlador PI del lazo de velocidad, de modo que se puede trabajar sólo con una acción proporcional.

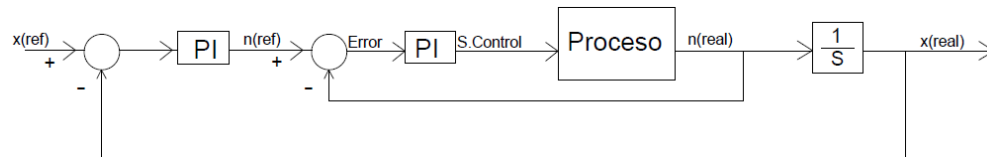
Para la señal de referencia del sistema r se toma la señal de referencia de velocidad $n(\text{ref})$ la cual se define por Siemens como el parámetro $r60$ en el accionamiento y

para la señal de salida **y** se toma la señal real de velocidad $n(\text{real})$ la cual la define Siemens como el parámetro $r63$ en el accionamiento (ver medición y exportación de datos del Manual de operación del Servomecanismo).

El sistema de control a trabajar para la variable de posición del sistema se define a partir del sistema de control implementado por Siemens, de igual forma que en el sistema de control de velocidad, el sistema presenta restricciones de operación, configuración y parametrización, de modo que no es posible modificar los lazos de control del accionamiento imposibilitando trabajar directamente con el lazo abierto de control de posición.

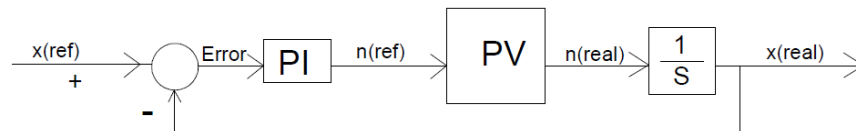
El diagrama de bloques que representa el sistema de control de posición implementado en este sistema, se diseña a partir del sistema de control PI de velocidad del Servomecanismo UV (figura 23), definiendo la posición como la variable a controlar por medio de un lazo de control (PI), la planta o el proceso es el sistema de control de velocidad de lazo cerrado PV y un integrador, y el lazo de realimentación es de ganancia unitaria este diagrama se presenta en la figura 24.

Figura 24. Sistema de control PI de posición del Servomecanismo UV



Donde $x(\text{ref})$ es la señal de referencia de posición, $x(\text{real})$ la señal de salida de posición, $n(\text{ref})$ es la velocidad de referencia de velocidad y $n(\text{real})$ la señal de salida de posición, la figura 25 representa el sistema de control equivalente para el proceso de velocidad.

Figura 25. Sistema de control PI de posición del Servomecanismo UV equivalente



Donde modelo del proceso de regulación de velocidad de lazo cerrado PV se define como:

$$PV = \frac{n(\text{real})}{n(\text{ref})} \quad (6)$$

Para la señal de referencia del sistema r se toma la señal de referencia de posición $x(\text{ref})$ la cual es definida por Siemens como el parámetro r2665 en el accionamiento y para la señal de salida y se toma la señal real de posición $x(\text{real})$ la cual es definida por Siemens como el parámetro r2521 en el accionamiento (ver medición y exportación de datos).

La unidad neutra de longitud **LU** es la unidad empleada por Siemens para la medición de posición del eje, de modo que es importante considerar la relación entre las magnitudes físicas y la unidad de medida LU.

3.4 LISTADO DE LAS PRÁCTICAS

Con el fin de realizar la construcción de las guías para el análisis en sistemas de control, se debe tener en cuenta que no es posible trabajar o modificar los lazos de control que tiene el módulo, de modo que el procedimiento y el análisis de las prácticas para alcanzar los objetivos cambiará de acuerdo con la forma en que se analizan los temas.

Considerando lo anterior las guías que se han propuesto a diseñar e implementar son:

- Reconocimiento de la bucla típica de realimentación y manejo de la herramienta computacional starter para el control de velocidad del servomecanismo UV
- Respuesta en el tiempo y modelado de sistemas dinámicos para control de velocidad
- Lugar geométrico de las raíces para el sistema de control de velocidad del servomecanismo UV
- Respuesta en frecuencia del control de velocidad para el servomecanismo UV
- Análisis y sintonía de las acciones de control P y PI para el control de velocidad del servomecanismo UV
- Diseño de controladores P y PI por medio del lugar geométrico de las raíces para el control de velocidad del servomecanismo UV
- Sistema de control de posición y manejo de la función tecnológica posicionador simple para el Servomecanismo UV
- Respuesta en el tiempo y modelado de sistemas dinámicos para el control de posición del Servomecanismo UV

3.5 OBJETIVOS, MATERIALES, MARCO TEÓRICO Y PROCEDIMIENTO

Para el diseño de cada guía, una vez conocidos los resultados anteriores, se procede a especificar los objetivos de cada tema planteado, los elementos o materiales requeridos para el desarrollo, además de definir el marco teórico y el procedimiento correspondiente en cada práctica, A continuación se especifican estos ítems para el desarrollo de cada práctica.

3.5.1 Práctica 1: Reconocimiento de la bucla típica de realimentación y manejo de la herramienta computacional STARTER para el control de velocidad del Servomecanismo UV

Un paso fundamental en el desarrollo de prácticas experimentales para el análisis y diseño de Sistemas de Control Lineal de un proceso es hacer el reconocimiento de la bucla típica de control, en la cual se realiza la identificación de sus componentes, su estructura y principio de funcionamiento, de igual forma es fundamental adquirir destrezas y conocimiento de las nuevas tecnologías y estrategias empleadas en el control de estos; esta práctica tiene como propósito guiar al lector para un reconocimiento del sistema y adquisición de habilidades en el software de puesta en marcha y medición del equipo.

Objetivos

General: Reconocer el proceso de regulación de velocidad del Servomecanismo UV y desarrollar competencias para su operación en el modo de regulación de velocidad con encóder.

Específicos:

- Reconocer los componentes físicos y la estructura que conforman el lazo típico de control de velocidad en el Servomecanismo UV.
- Poner en marcha el Servomecanismo UV con la plataforma STARTER.
- Aprender a medir y a exportar los datos asociados a los experimentos desarrollados en el de Servomecanismo UV con la plataforma STARTER.

Elementos y materiales

El Servomecanismo UV es una plataforma equipada con el fin de controlar dos motores síncronos de corriente alterna a través de las unidades de control de los accionamientos Sinamics S110 o desde un controlador superior PLC S7-300. Para el desarrollo de esta práctica se emplea un accionamiento Sinamics S110 con el fin de regular la velocidad sobre un motor de corriente alterna de imanes permanentes (síncrono) 1KF7, los elementos y materiales necesarios son los siguientes:

- 1 Unidad de control CU305 DP 6SL3 040-0JA00-0Axx.

- 1 Unidad de potencia Module 340 6SL3210-1SB12-3Axx (240V AC).
- 1 Motor síncrono 1KF7032-xAF2x-xxxx 3000U/min (Imanes permanentes).
- 1 Encóder 1K7xxx-xxxxx-xAxx (sen/cos incremental), 2048, 1Vpp.
- 1 Acondicionador de señal SMC20 (sensor módulo Cabinet-Mounted).
- Adaptador Simatic PC USB A2.
- Software STARTER.
- Manual de operación para el control de velocidad y de posición del Servomecanismo UV utilizando STARTER.

Marco teórico

Los temas empleados en el desarrollo de esta práctica se definieron con el fin de brindar una herramienta conceptual que permita al lector conocer el proceso o sistema en estudio, los temas definidos permiten describir el Servomecanismo UV con el fin de reconocer los componentes, estructura, principio de funcionamiento y el sistema de control de velocidad a trabajar, estos temas se exponen en la sección 1.3 del cuaderno de prácticas de Control Lineal para el Servomecanismo UV (ver anexo A) de este documento.

Procedimiento

El desarrollo experimental de esta práctica se realiza a través de la plataforma STARTER para puesta en marcha y medición del equipo, por lo tanto es necesario ver la sección 2 (sin la sección 2.4) para regulación de velocidad y la sección 3 para la medición y exportación de datos del manual de operación para el Control de velocidad y de posición del Servomecanismo UV Utilizando STARTER.

Ejercicio 1

Reconocimiento de la bucla típica

- Reconocer el lazo típico de control de Velocidad y sus componentes, para el Servomecanismo UV (acompañarlo de una lista de chequeo).

Ejercicio 2

Creación del proyecto y puesta en marcha

- Crear un proyecto en la plataforma STARTER para el Servomecanismo UV.
- Poner en marcha el Servomecanismo UV para la regulación de velocidad con encóder.
- Asignar una velocidad de referencia para el motor de 1000 rpm, 2000 rdpm, 3000 rpm en sentido directo.
- Cambiar el sentido de giro del motor para las tres velocidades diferentes mencionadas en el punto anterior.
- En el punto de operación de 3000 rpm aplicar un cambio en la referencia de amplitud positiva y negativa de 150 rpm (escalón).

Ejercicio 3

Medición y exportación

- Realizar la medición de la velocidad de referencia y la velocidad real del sistema para los puntos anteriores empleando la función TRACE de la herramienta STARTER.
- Exportar las mediciones realizadas en hojas de datos (Excel, Bloc de notas).

Nota: Para la velocidad de referencia medir el parámetro r60 y para la velocidad real el parámetro r63, la unidad de medida empleada para la velocidad del Servomecanismo UV está en rpm.

3.5.2 Práctica 2: Respuesta en el tiempo y modelado de sistemas dinámicos para control de velocidad

La identificación de procesos permite desarrollar habilidades experimentales, enriqueciendo además los conceptos teóricos de Sistemas Automáticos de Control así como el manejo de las nuevas herramientas tecnológicas. En el caso específico del Servomecanismo UV, comprender el procedimiento experimental y analítico de la identificación dinámica para el caso del lazo de control de velocidad, permitirá al estudiante desarrollar habilidades en el análisis que le serán muy útiles cuando se esté desempeñando en el campo laboral.

Objetivos

General: Adquirir habilidades para analizar el desempeño estático y dinámico de un proceso y a partir de esta información obtener el modelo matemático.

Específicos:

- Obtener la curva dinámica del Servomecanismo UV utilizando STARTER
- A partir de la información de la respuesta temporal en lazo cerrado, obtener un modelo dinámico del proceso de lazo abierto
- Validar los modelos obtenidos

Elementos y materiales

El Servomecanismo UV es una plataforma equipada con el fin de controlar dos motores síncronos de corriente alterna a través de las unidades de control de los accionamientos Sinamics S110 o desde un controlador superior PLC S7-300. Para el desarrollo de esta práctica se emplea un accionamiento Sinamics S110 con el fin de regular la velocidad sobre un motor de corriente alterna de imanes permanentes (síncrono) 1KF7, los elementos y materiales necesarios son los siguientes:

- 1 Unidad de control CU305 DP 6SL3 040-0JA00-0Axx.
- 1 Unidad de potencia Module 340 6SL3210-1SB12-3Axx (240V AC).

- 1 Motor síncrono 1KF7032-xAF2x-xxxx 3000U/min (Imanes permanentes).
- 1 Encóder 1K7xxx-xxxxx-xAxx (sen/cos incremental), 2048, 1Vpp.
- 1 Acondicionador de señal SMC20 (sensor módulo Cabinet-Mounted).
- Adaptador Simatic PC USB A2.
- Software STARTER.
- Manual de operación para el control de velocidad y de posición del Servomecanismo UV utilizando STARTER.
- Herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación.

Marco teórico

Los métodos empleados en la realización de esta práctica se definieron a partir de las condiciones, restricciones y principio de funcionamiento del Servomecanismo UV, considerando el objetivo general de esta práctica, el cual es encontrar un modelo matemático que permita describir dinámicamente el sistema de velocidad del servomecanismo, se debe tener en cuenta que el controlador PI empleado en la regulación de velocidad no tiene la opción de operar manualmente, lo que hace que el lazo de regulación de velocidad empleado no se pueda abrir, de modo que se propone un método de identificación del proceso a partir de la respuesta de lazo cerrado considerando la dinámica de realimentación y del controlador, encontrando el modelo de la planta en lazo abierto, los temas definidos para esta práctica se exponen en la sección 2.3 del cuaderno de prácticas de Control Lineal para el Servomecanismo UV (ver anexo A) de este documento.

Procedimiento

Para el desarrollo experimental de esta práctica es necesario desactivar el parámetro de acción integral T_i del regulador de velocidad PI con el propósito de trabajar solo empleando un controlador con acción proporcional K_p , para modificar estos parámetros del controlador empleando la herramienta STARTER, es necesario ver la sección 4 y 4.1 del manual de operación para el control de velocidad y de posición del Servomecanismo UV Utilizando STARTER.

Ejercicio

Poner en marcha el accionamiento para los siguientes puntos de operación del sistema: 2500, 3000 y 3500 rpm y realizar las pruebas siguientes:

- Aumentar la ganancia proporcional K_p del controlador PI del regulador de velocidad  y excitar con un escalón de 150 rpm alrededor del punto de operación, hasta obtener una respuesta subamortiguada (tomar el mismo valor de ganancia para los tres puntos).

Nota: Al aumentar la ganancia del controlador tener precaución de no llevar hasta inestabilidad el sistema, de modo que se recomienda realizar pequeños

aumentos de ganancia hasta obtener una respuesta subamortiguada ante el escalón aplicado, la ganancia proporcional no debe exceder el valor de $k_p = 0.09 \text{ Nms/rad}$.

- Utilizar la función TRACE para observar la respuesta temporal del sistema ante cambios de la referencia para el punto anterior.
- Realizar para los tres puntos de operación diferentes la medición y exportación de la respuesta subamortiguada del sistema en cada una de las excitaciones (sentido positivo y negativo).
- Importar los datos de la medición utilizando herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación, y para cada punto de operación obtener un modelo que permita identificar el proceso a partir de la respuesta Subamortiguada del sistema empleando el método de Yuwana y Seborg de lazo cerrado ver la ecuación (13) del cuaderno de guías experimentales.
- Encontrar un modelo equivalente como promedio de los tres modelos obtenidos anteriormente.
- Validar el modelo obtenido del proceso con los datos obtenidos en Matlab o Scilab, comparando la medición hecha de la respuesta subamortiguada del sistema con la respuesta al escalón del modelo obtenido con realimentación unitaria y ganancia del controlador conocida.

Para la medición y extracción de datos se utiliza la función TRACE del software STARTER visto en la práctica anterior, se recomienda utilizar la función TRACE con limitación de tiempo debido a que tiene una frecuencia de muestreo mejor y registra de forma directa los cambios de referencia. Tomar como señal de referencia el parámetro de consigna de velocidad antes del filtro r60 y como señal de salida del sistema el parámetro de velocidad real r63.

3.5.3 Práctica 3: Lugar Geométrico de las Raíces para el Sistema de Control de velocidad del servomecanismo UV

Con el fin de comprender el comportamiento dinámico y la estabilidad del sistema de control de velocidad del Servomecanismo UV, en esta práctica se plantea el procedimiento analítico-experimental para contrastar y analizar el comportamiento dinámico del modelo obtenido en la práctica anterior, ante variaciones de los parámetros del controlador. Para realizar la comparación y validación del modelo obtenido, se emplean herramientas informáticas.

Objetivos

General: analizar el desempeño dinámico y la estabilidad del sistema a partir del efecto de la variación de uno de sus parámetros del lazo de control como es la ganancia del controlador contrastando la respuesta temporal del sistema con la respuesta temporal del modelo obtenido experimentalmente.

Específicos:

- Construir el lugar geométrico de las raíces con herramientas informáticas
- Analizar el comportamiento dinámico y estabilidad del sistema de acuerdo con el lugar geométrico de las raíces.
- Obtener la ganancia crítica del sistema.

Elementos y materiales

El Servomecanismo UV es una plataforma equipada con el fin de controlar dos motores síncronos de corriente alterna a través de las unidades de control de los accionamientos Sinamics S110 o desde un controlador superior PLC S7-300. Para el desarrollo de esta práctica se emplea un accionamiento Sinamics S110 con el fin de regular la velocidad sobre un motor de corriente alterna de imanes permanentes (síncrono) 1KF7, los elementos y materiales necesarios son los siguientes:

- 1 Unidad de control CU305 DP 6SL3 040-0JA00-0Axx.
- 1 Unidad de potencia Module 340 6SL3210-1SB12-3Axx (240V AC).
- 1 Motor síncrono 1KF7032-xAF2x-xxxx 3000U/min (Imanes permanentes).
- 1 Encóder 1K7xxx-xxxxx-xAxx (sen/cos incremental), 2048, 1Vpp.
- 1 Acondicionador de señal SMC20 (sensor módulo Cabinet-Mounted).
- Adaptador Simatic PC USB A2.
- Software STARTER.
- Manual de operación para el control de velocidad y de posición del Servomecanismo UV utilizando STARTER.
- Herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación.

Marco teórico

Los métodos y temas empleados en el desarrollo experimental y analítico de esta práctica se definen a partir de los objetivos especificados, los cuales tienen como fin analizar el comportamiento dinámico del sistema y el efecto de la variación de uno de sus parámetros como es la ganancia del controlador, permitiendo construir el lugar geométrico del sistema y a partir de este, analizar la estabilidad relativa de este, la variación de los polos de red cerrada, los temas definidos para esta práctica se exponen en la sección 3.3 del cuaderno de prácticas de Control Lineal para el Servomecanismo UV (ver anexo A) de este documento.

Procedimiento

Repetir el procedimiento 4 de configuración del manual de operación del Servomecanismo UV igual que en la práctica 2, con el fin de ajustar el controlador del regulador de velocidad  para trabajar solo con la acción proporcional del controlador.

Ejercicio

Poner en marcha el Servomecanismo UV tomando como base uno de los puntos de operación ya trabajados anteriormente y realizar las siguientes pruebas.

- Varíe la ganancia del controlador proporcional y registre las respuestas temporales obtenidas ante entradas escalón para cada ganancia (mínimo 5 ganancias).
- Con base en el modelo dinámico obtenido con anterioridad generar el lugar geométrico de las raíces y encontrar la ganancia crítica del sistema K_c y el periodo crítico T_c utilizando herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación.
- Comparar las respuestas dinámicas obtenidas con el modelo con los resultados obtenidos experimentalmente para cada ganancia registrada haciendo uso de herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación.
- Analice los datos obtenidos experimentales con los teóricos.

Nota: Para comparar las respuestas obtenidas para cada ganancia registrada se debe comparar los resultados obtenidos experimentalmente con la respuesta al escalón del modelo obtenido con realimentación unitaria y ganancia del controlador conocida.

3.5.4 Práctica 4: respuesta en frecuencia del control de velocidad para el Servomecanismo UV

Con el fin de obtener los parámetros característicos de la respuesta en frecuencia del sistema de control de velocidad del Servomecanismo UV para su análisis y diseño, esta práctica plantea el procedimiento experimental para obtener estos parámetros analíticamente a partir del diagrama de Bode entregado por la herramienta STARTER de puesta en marcha y medición del equipo.

Objetivos

General: A partir de análisis por respuesta en frecuencia determinar la estabilidad y características dinámicas y estáticas del sistema.

Específicos:

- Obtener el diagrama de Bode del Sistema de Control de velocidad para el sistema de lazo cerrado utilizando STARTER
- Determinar las características y parámetros de margen de estabilidad, margen de fase, margen de ganancia, pico de resonancia, frecuencia de resonancia, frecuencia de corte y ancho de banda del sistema.

Elementos y materiales

El Servomecanismo UV es una plataforma equipada con el fin de controlar dos motores síncronos de corriente alterna a través de las unidades de control de los accionamientos Sinamics S110 o desde un controlador superior PLC S7-300. Para el desarrollo de esta práctica se emplea un accionamiento Sinamics S110 con el fin de regular la velocidad sobre un motor de corriente alterna de imanes permanentes (síncrono) 1KF7, los elementos y materiales necesarios son los siguientes:

- 1 Unidad de control CU305 DP 6SL3 040-0JA00-0Axx.
- 1 Unidad de potencia Module 340 6SL3210-1SB12-3Axx (240V AC).
- 1 Motor síncrono 1KF7032-xAF2x-xxxx 3000U/min (Imanes permanentes).
- 1 Encóder 1K7xxx-xxxxx-xAxx (sen/cos incremental), 2048, 1Vpp.
- 1 Acondicionador de señal SMC20 (sensor módulo Cabinet-Mounted).
- Adaptador Simatic PC USB A2.
- Software STARTER.
- Manual de operación para el control de velocidad y de posición del Servomecanismo UV utilizando STARTER.
- Herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación.

Marco teórico

Los métodos y temas empleados en el aprendizaje experimental y analítico de la respuesta en frecuencia de este sistemas son definidos de acuerdo con los objetivos especificados de esta práctica, los cuales permiten identificar y analizar las principales características del respuesta en frecuencia del sistema de control de Velocidad y además adquirir destrezas en el trazo del diagrama de Bode entregado por el Software STARTER de la plataforma, los temas definidos para esta práctica se exponen en la sección 4.3 del cuaderno de prácticas de Control Lineal para el Servomecanismo UV (ver anexo A) de este documento.

Procedimiento

Para el desarrollo experimental de esta práctica se debe trazar el diagrama de Bode a partir de la función de medida  del software STARTER de la plataforma, para trazar este diagrama es necesario ver la sección 5 del manual de operación del Servomecanismo UV.

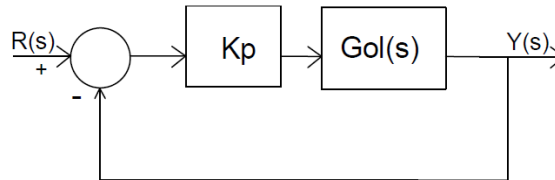
Ejercicio

- Trazar el diagrama de Bode empleando la función de medida  de STARTER para el sistema de regulación de velocidad empleando un controlador proporcional de ganancia ($k_p = 0.003$).

- Obtener el modelo dinámico de la función de transferencia del sistema en lazo cerrado $T(s)$ a partir del diagrama de Bode, se recomienda emplear los cursores de medición para medir la ganancia (dB) y la frecuencia (Hz) del sistema (Considerar el sistema como un modelo de primer orden más tiempo muerto y utilizar la ecuación (36) del cuaderno de guías experimentales para encontrar el tiempo muerto del sistema).
- Encontrar el modelo del sistema en lazo abierto $G_{ol}(s)$ a partir del modelo de lazo cerrado $T(s)$, considerar para el sistema de la figura 26 Si $T(s) = \frac{N1(s)}{D1(s)}$, Entonces:

$$G_{ol}(s) = \frac{N1(s)}{N1(s) - D1(s)} * \left(\frac{1}{K}\right) \quad (7)$$

Figura 26. Sistema de control con acción proporcional de ganancia k_p



- Para el modelo en lazo abierto $G_{ol}(s)$, trazar el diagrama de Bode haciendo uso de herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación, y determinar el margen de fase y margen de ganancia.
- Trazar el diagrama de Bode del Sistema en lazo cerrado utilizando MATLAB, considerar una realimentación unitaria y la ganancia del controlador proporcional conocida $k_p = 0.003$.
- Determinar para el punto anterior la frecuencia de resonancia, el pico de resonancia, la frecuencia de corte y ancho de banda

3.5.5 Práctica 5: Análisis y sintonía de las acciones de control P y PI para el control de velocidad del servomecanismo UV

Un aspecto fundamental en el desarrollo de un Sistema de Control de un proceso, es definir o reconocer el controlador a emplear, con el fin de obtener el rendimiento deseado del sistema. Para definir este controlador es necesario conocer su principio de funcionamiento y el efecto que tiene en la respuesta del sistema, además de conocer diferentes métodos que permitan encontrar los valores de sus parámetros.

Existen diferentes métodos que permiten determinar los valores de los parámetros de un controlador, algunos métodos son empíricos y otros de diseño, los métodos empíricos se emplean para sintonizar o ajustar los controladores de un sistema pero tienen la desventaja de no poder especificar rendimientos deseados, mientras que

en los métodos de diseño permiten a partir de las especificaciones de funcionamiento proponer el controlador adecuado.

Esta práctica presenta el procedimiento experimental y analítico para conocer el efecto de las acciones de control P y PI empleadas en la regulación de Velocidad de Servomecanismo UV, además de realizar el ajuste o sintonización de los parámetros del controlador para el proceso estudiado.

Objetivos

General: Analizar y ajustar de las acciones de control P y PI del lazo de control de velocidad del Servomecanismo UV.

Específicos:

- Analizar los efectos de las estrategias de control P y PI a partir de la variación de sus parámetros.
- Realizar el ajuste de las acciones de control mencionadas en el punto anterior a partir de métodos empíricos de sintonía de controladores.
- Validar los controladores obtenidos.

Elementos y materiales

El Servomecanismo UV es una plataforma equipada con el fin de controlar dos motores síncronos de corriente alterna a través de las unidades de control de los accionamientos Sinamics S110 o desde un controlador superior PLC S7-300. Para el desarrollo de esta práctica se emplea un accionamiento Sinamics S110 con el fin de regular la velocidad sobre un motor de corriente alterna de imanes permanentes (síncrono) 1KF7, los elementos y materiales necesarios son los siguientes:

- 1 Unidad de control CU305 DP 6SL3 040-0JA00-0Axx.
- 1 Unidad de potencia Module 340 6SL3210-1SB12-3Axx (240V AC).
- 1 Motor síncrono 1KF7032-xAF2x-xxxx 3000U/min (Imanes permanentes).
- 1 Encóder 1K7xxx-xxxxx-xAxx (sen/cos incremental), 2048, 1Vpp.
- 1 Acondicionador de señal SMC20 (sensor módulo Cabinet-Mounted).
- Adaptador Simatic PC USB A2.
- Software STARTER.
- Manual de operación para el control de velocidad y de posición del Servomecanismo UV utilizando STARTER.

Marco teórico

Los métodos empleados en la realización de esta práctica se definieron considerando que el principal objetivo de esta práctica es analizar y comprender el comportamiento de las acciones de control P y PI, y ajustar a partir de métodos

heurísticos los parámetros de los controladores, los temas definidos para esta práctica se exponen en la sección 5.3 del cuaderno de prácticas de Control Lineal para el Servomecanismo UV (ver anexo A) de este documento.

Procedimiento

Ejercicio 1

Acción proporcional

- Para el modelo dinámico del proceso obtenido experimentalmente en la práctica 2, sintonizar mediante las técnicas de ajustes empíricos (seleccionando la técnica que presente un mejor resultado) un controlador P proporcional haciendo uso de herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación (utilizar los valores T, To y K).
- Analizar el efecto de aumentar y disminuir la ganancia proporcional Kp y llenar la tabla 4, haciendo uso de herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación.
- Para el Servomecanismo UV considerando un controlador proporcional, asignar el valor de ganancia proporcional Kp encontrado en el primer punto en el regulador de velocidad del Sistema  de igual forma que en la prácticas anteriores.
- Para el Servomecanismo UV asignar una ganancia proporcional Kp en el regulador de velocidad del Sistema  y analizar el efecto de aumentar y disminuir la ganancia proporcional Kp y llenar la tabla 4.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (8)$$

Tabla 4. Acción Proporcional P (Variación de la ganancia kp)

Acción Proporcional P						
	Kp	Tiempo de estabilización Ts (s)	Entrada	Salida	Error (%)	Sobrepaso máximo Mp(%)
Modelo						
Medición						
Modelo						
Medición						
Modelo						
Medición						
Modelo						
Medición						
Modelo						
Medición						

Ejercicio 2

Acción Proporcional-Integral PI

- Para el modelo dinámico del proceso obtenido experimentalmente en la práctica 2, sintonizar mediante las técnicas de ajustes empíricos (seleccionando la técnica que presente un mejor resultado) un controlador Proporcional-Integral PI de ganancia proporcional K_p y tiempo de acción integral T_i , haciendo uso de herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación (utilizar los valores T , T_o y K).
- Para el modelo experimental analizar el efecto de aumentar y disminuir la ganancia proporcional K_p y el tiempo de acción integral T_i , y llenar la tabla 5 haciendo uso de herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación.
- Para el Servomecanismo UV considerando un controlador Proporcional-Integral, asignar el valor de ganancia proporcional K_p y tiempo de acción integral T_i encontrado en el primer punto en el regulador de velocidad del Sistema  de igual forma que en la prácticas anteriores.
- Para el Servomecanismo UV asignar una ganancia proporcional K_p y tiempo de acción integral T_i en el regulador de velocidad del Sistema , y analizar el efecto de aumentar y disminuir la ganancia proporcional K_p y tiempo de acción integral T_i y llenar la tabla 5.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p}{s} \left(s + \frac{1}{T_i} \right) \quad (9)$$

Tabla 5. Acción Proporcional Integral PI (variación de ganancia K_p y acción integral T_i)

Acción Proporcional Integral PI							
	K_p	T_i (s)	Tiempo de estabilización T_s (s)	Entrada	Salida	Error (%)	Sobrepaso máximo M_p (%)
Modelo							
Medición							
Modelo							
Medición							
Modelo							
Medición							
Modelo							
Medición							
Modelo							
Medición							

3.5.6 Práctica 6: Diseño de controladores P y PI por medio del lugar geométrico de las raíces para el control de velocidad del servomecanismo UV

Existen diferentes técnicas de diseño que permiten encontrar el tipo de compensador necesario y el valor de ajuste de sus parámetros con el fin de cumplir las especificaciones de desempeño establecidas por el diseñador. La técnica de diseño por el método del lugar geométrico de las raíces permite encontrar la el tipo de compensador necesario y los valores de sus parámetros a partir de especificaciones en el dominio del tiempo como el sobrepaso, el tiempo de estabilización y el error de estado estacionario.

Considerando el lazo de control de velocidad del Servomecanismo UV con un controlador PI, en esta práctica se presenta el procedimiento analítico para realizar el diseño de este controlador y el procedimiento experimental de autosintonía del servomecanismo con el fin de encontrar los parámetros del controlador para el proceso estudiado.

Objetivos

General: Realizar el diseño del controlador PI del lazo de control de velocidad del Servomecanismo UV a partir de especificaciones de diseño por medio de los criterios de magnitud y ángulo del lugar geométrico de las Raíces.

Específicos:

- Diseñar un controlador P y un controlador PI a partir de especificaciones dinámicas de desempeño empleando el método del lugar geométrico de las raíces para del Sistema de Control de velocidad.
- Validar los controladores obtenidos

Elementos y materiales

El Servomecanismo UV es una plataforma equipada con el fin de controlar dos motores síncronos de corriente alterna a través de las unidades de control de los accionamientos Sinamics S110 o desde un controlador superior PLC S7-300. Para el desarrollo de esta práctica se emplea un accionamiento Sinamics S110 con el fin de regular la velocidad sobre un motor de corriente alterna de imanes permanentes (síncrono) 1KF7, los elementos y materiales necesarios son los siguientes:

- 1 Unidad de control CU305 DP 6SL3 040-0JA00-0Axx.
- 1 Unidad de potencia Module 340 6SL3210-1SB12-3Axx (240V AC).
- 1 Motor síncrono 1KF7032-xAF2x-xxxx 3000U/min (Imanes permanentes).
- 1 Encóder 1K7xxx-xxxxx-xAxx (sen/cos incremental), 2048, 1Vpp.
- 1 Acondicionador de señal SMC20 (sensor módulo Cabinet-Mounted).
- Adaptador Simatic PC USB A2.

- Software STARTER.
- Manual de operación para el control de velocidad y de posición del Servomecanismo UV utilizando STARTER.

Marco teórico

Los métodos empleados en la realización de esta práctica se definieron a partir de los objetivos especificados, con el fin de proponer un diseño de los controladores P y PI mediante requerimientos o especificaciones de diseño, los temas definidos para esta práctica se exponen en la sección 6.3 del cuaderno de prácticas de Control Lineal para el Servomecanismo UV (ver anexo A) de este documento.

Procedimiento

Ejercicio 1

Acción proporcional

- Para el modelo dinámico del proceso obtenido experimentalmente en la práctica 2, diseñar un controlador P para obtener en la respuesta del sistema un error de posición de $E_{ssp} = 20\%$.
- Excitar el sistema de lazo cerrado para el modelo del proceso con el controlador obtenido anteriormente y llenar la tabla 6 (usar herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación).
- Para el Servomecanismo UV considerando un controlador proporcional, asignar el valor de ganancia proporcional K_p encontrado en el punto anterior en el regulador de velocidad del Sistema  de igual forma que en la prácticas anteriores y llenar la tabla 6.

Tabla 6. Diseño de la acción Proporcional P

Acción Proporcional P						
	K_p	Tiempo de estabilización T_s (s)	Entrada	Salida	Error (%)	Sobrepaso máximo M_p (%)
Modelo						
Medición						

Ejercicio 2

Acción Proporcional-Integral PI

- Para el modelo dinámico del proceso obtenido experimentalmente en la práctica 2, diseñar un controlador PI mediante el lugar geométrico de las raíces para obtener en la respuesta del sistema un tiempo de estabilización de $t_s = 20\text{ms}$ y un sobrepaso $SP \leq 10\%$, ante una entrada escalón.

- Excitar el sistema de lazo cerrado para el modelo del proceso con el controlador obtenido anteriormente y llenar la tabla 7 (usar herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación).
- Para el Servomecanismo UV considerando un controlador Proporcional Integral PI, asignar el valor de ganancia proporcional K_p y tiempo de acción integral T_i encontrado en el punto anterior en el regulador de velocidad del Sistema  de igual forma que en la prácticas anteriores y llenar la tabla 7.

Tabla 7. Diseño de la Acción Proporcional Integral PI

Acción Proporcional Integral PI							
	K_p	T_i (s)	Tiempo de estabilización T_s (s)	Entrada	Salida	Error (%)	Sobrepaso máximo M_p (%)
Modelo							
Medición							

3.5.7 Práctica 7: Sistema de control de posición y manejo de la función tecnológica posicionador simple para el Servomecanismo UV

Es fundamental en el estudio y diseño de los sistemas automáticos de control, comprender el proceso de regulación de posición de un servosistema al igual que el de velocidad. Una vez conocido el modelo y realizado la sintonía de los parámetros de los controladores del sistema de velocidad del Servomecanismo UV, esta guía tiene como fin reconocer el principio de funcionamiento del control de posición empleado, además de configurar y operar la plataforma STARTER para el control de posición del sistema por medio de la función tecnológica posicionador simple.

Objetivos

General: Adquirir habilidades en la operación y manejo del Servomecanismo UV para la función de regulación de posición y de posicionador simple (PosS) del Sinamics S110.

Específicos:

- Diseñar un controlador P y un controlador PI a partir de especificaciones dinámicas de desempeño empleando el método del lugar geométrico de las raíces para del Sistema de Control de velocidad.
- Validar los controladores obtenidos

Elementos y materiales

El Servomecanismo UV es una plataforma equipada con el fin de controlar dos motores síncronos de corriente alterna a través de las unidades de control de los

accionamientos Sinamics S110 o desde un controlador superior PLC S7-300. Para el desarrollo de esta práctica se emplea un accionamiento Sinamics S110 con el fin de regular la velocidad sobre un motor de corriente alterna de imanes permanentes (síncrono) 1KF7, los elementos y materiales necesarios son los siguientes:

- 1 Unidad de control CU305 DP 6SL3 040-0JA00-0Axx.
- 1 Unidad de potencia Module 340 6SL3210-1SB12-3Axx (240V AC).
- 1 Motor síncrono 1KF7032-xAF2x-xxxx 3000U/min (Imanes permanentes).
- 1 Encóder 1K7xxx-xxxxx-xAxx (sen/cos incremental), 2048, 1Vpp.
- 1 Acondicionador de señal SMC20 (sensor módulo Cabinet-Mounted).
- Software STARTER
- Manual de operación para el control de velocidad y posición del Servomecanismo UV utilizando STARTER
- Adaptador Simatic PC USB A2
- Herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación.
- Disco de posición angular para el servomecanismo

Marco teórico

Los métodos empleados en la realización de esta práctica se definieron a partir del sistema de control de posición del accionamiento, del principio de funcionamiento y de la puesta en marcha del Sinamics S110 para el posicionador, los temas definidos para esta práctica se exponen en la sección 7.3 del cuaderno de prácticas de Control Lineal para el Servomecanismo UV (ver anexo A) de este documento.

Procedimiento

El desarrollo experimental de esta práctica se realiza a través de la plataforma STARTER para puesta en marcha y medición del equipo, por lo tanto se debe emplear el archivo creado en las prácticas anteriores y ver la sección 2.4 de puesta en marcha para el posicionador (simple), si no se cuenta con el archivo se recomienda repetir todos los pasos de la sección 2 de este manual. Considerar la relación entre las magnitudes físicas de $1\text{rev}=1000\text{LU}$ ver figura 13 del manual de operación para el control de velocidad y posición del servomecanismo UV

Nota: Para la práctica 7 y 8 se debe ensamblar el disco de posición angular del servomecanismo al eje del motor.

Ejercicio 1

Puesta en marcha

- Configurar la búsqueda e iniciar la búsqueda del punto de referencia
- Poner en marcha el servomecanismo para una posición angular absoluta de 180° y una velocidad de 60 [1000LU/min] o 60rpm

- Poner en marcha el accionamiento para una posición relativa de 90° y una velocidad de 80[1000LU/min] o 80rpm

Creación de una secuencia

Realizar la siguiente secuencia de desplazamiento empleando con una velocidad de 80[1000LU/min] o 80rpm.

- Posicionar el eje a una distancia absoluta de 45°
- 3 segundos después posicionar el eje a una posición absoluta de 90°
- 3 segundos después posicionar el eje a una posición relativa 45°
- 4 segundos después una distancia relativa de 45°
- 2 segundos después posicionar el eje a posición de relativa de 180°
- 2 segundos después posicionar el eje a posición absoluta de 0°

Ejercicio 2

Medición y exportación

- Realizar la medición de la posición de referencia y la posición real del sistema para los puntos anteriores empleando la función TRACE de la herramienta STARTER.
- Exportar las mediciones realizadas en hojas de datos (Excel, Bloc de notas).
- Nota: Para la posición de referencia medir el parámetro r2665 y para la posición real el parámetro r2521, la unidad de medida empleada para la velocidad del Servomecanismo UV está en rpm.

3.5.8 Práctica 8: Respuesta en el tiempo y modelado de sistemas dinámicos para control de posición del Servomecanismo UV

La regulación de posición empleada por el servomecanismo UV a través del variador de velocidad Sinamics S110 solo es posible habilitarla para puesta en marcha por medio del posicionador simple, este posicionador simple tiene como función en el sistema de control, especificar la consigna del punto de referencia de posición del sistema (LU), esta consigna es asignada por medio de una señal tipo rampa en la cual la pendiente de esta señal es la posición ejemplo: (1rev/min) o (1000 LU/min), además esta regulación de posición, al igual que la servorregulación o regulación de velocidad, presenta restricciones de operación y limitaciones imposibilitando modificar los lazos y el tipo de señal del sistema.

Considerando lo anterior no es posible emplear una técnica de experimentación de lazo abierto y tampoco de lazo cerrado debido a que no se pueden modificar los lazos de control y tampoco aplicar señales de referencia tipo escalón para encontrar el modelo dinámico de lazo abierto del sistema de posición. De modo que para

encontrar el modelo dinámico del sistema se debe trabajar con el modelo obtenido a partir de la respuesta temporal del sistema de control de velocidad en lazo cerrado, y conociendo este modelo y la estructura del sistema de control de posición (ver figura 30), encontrar el modelo en lazo abierto y el modelo en lazo cerrado de posición, para finalmente comparar y validar los datos obtenidos con la respuesta temporal del sistema de posición en lazo cerrado para un controlador con parámetros conocidos y una señal tipo rampa.

Objetivos

General: Comprender la estructura del sistema dinámico de control de posición del servomecanismo.

Específicos:

- Obtener el modelo de lazo abierto del sistema de posición a partir del modelo del sistema de velocidad
- Obtener el modelo del sistema de control de posición en lazo cerrado conociendo los parámetros del controlador
- Comparar y validar los datos obtenidos del modelo con la respuesta temporal del sistema en lazo cerrado, conociendo los parámetros del controlador y aplicando una señal tipo rampa

Elementos y materiales

El Servomecanismo UV es una plataforma equipada con el fin de controlar dos motores síncronos de corriente alterna a través de las unidades de control de los accionamientos Sinamics S110 o desde un controlador superior PLC S7-300. Para el desarrollo de esta práctica se emplea un accionamiento Sinamics S110 con el fin de regular la velocidad sobre un motor de corriente alterna de imanes permanentes (síncrono) 1KF7, los elementos y materiales necesarios son los siguientes:

- 1 Unidad de control CU305 DP 6SL3 040-0JA00-0Axx.
- 1 Unidad de potencia Module 340 6SL3210-1SB12-3Axx (240V AC).
- 1 Motor síncrono 1KF7032-xAF2x-xxxx 3000U/min (Imanes permanentes).
- 1 Encóder 1K7xxx-xxxxx-xAxx (sen/cos incremental), 2048, 1Vpp.
- 1 Acondicionador de señal SMC20 (sensor módulo Cabinet-Mounted).
- Software STARTER
- Manual de operación para el control de velocidad y posición del Servomecanismo UV utilizando STARTER
- Adaptador Simatic PC USB A2
- Herramientas tecnológicas empleadas para simulación y validación.
- Disco de posición angular para el servomecanismo

Marco teórico

Los temas mencionados de identificación de procesos y modelado dinámicos en la práctica 2 de este libro se utilizan de igual forma en esta práctica para identificar el modelo del sistema de control de velocidad, otros temas fundamentales para el desarrollo de esta guía se exponen en la sección 8.3 del cuaderno de prácticas de Control Lineal para el Servomecanismo UV (ver anexo A) de este documento.

Procedimiento

El desarrollo experimental de esta práctica se realiza a través de la plataforma STARTER para puesta en marcha y medición del equipo, por lo tanto se debe poner en marcha el sistema para la función posicionador simple para activar la regulación de posición de igual forma que en la practica 7.

Nota: Para la práctica 7 y 8 se debe asignar o ensamblar el disco de posición angular del servomecanismo al eje del motor, además

Ejercicio 1

Modelo del sistema dinámico de velocidad en lazo abierto y lazo cerrado

- Encontrar el modelo del proceso de lazo abierto G_p del sistema del control de velocidad del servomecanismo UV para un punto de operación de 0rpm, utilizando el método de identificación de lazo cerrado de igual forma que en la practica 2.
- Para el modelo dinámico del proceso obtenido en el punto anterior, diseñar un controlador PI mediante el lugar geométrico de las raíces para obtener en la respuesta del sistema un tiempo de estabilización de $t_s = 30ms$ y un sobrepaso $SP \leq 20\%$,
- Encontrar el modelo de lazo cerrado para el sistema de control del punto anterior PV ver ecuación (58) del anexo A.

Ejercicio 2

Modelo del sistema dinámico de posición en lazo abierto y lazo cerrado

- Encontrar el modelo del sistema de posición en lazo abierto $G_{x_{ol}}$ a partir del modelo de lazo cerrado de velocidad encontrado en el punto anterior emplear ecuación (62) del anexo A.
- Encontrar el modelo de lazo cerrado del sistema de control de posición $G_{x_{cl}}$ para un controlador proporcional de ganancia $K_v=3000$ ver figura 34 y ecuación (63) del anexo A.
- Para el modelo de lazo cerrado de posición obtenido en el punto anterior, encontrar la respuesta temporal ante una señal de referencia tipo rampa con una pendiente de 2500 LU/seg, con el fin de obtener los datos de posición en LU y los de tiempo en segundos para la comparación.

Ejercicio 3

Respuesta temporal del sistema de posición en lazo cerrado con STARTER

- Poner en marcha el servomecanismo para el posicionador simple y asignar el punto de operación del sistema a una posición absoluta de 0 LU
- Asignar una ganancia $K_v=3000\text{rpm}$ o 3 [1000rev/min] (ver sección 4.2.1 del manual de operación de velocidad y posición)
- Realizar un cambio en la referencia del sistema desplazando el eje a una posición absoluta de 1000LU a una velocidad de 150 rpm.
- Realizar la medición de la posición de referencia r_{2665} y la posición real r_{2521} del sistema para los puntos anteriores empleando la función TRACE de la herramienta STARTER (ver sección 3 del manual de operación) y exportar las mediciones realizadas en hojas de datos (Excel, Bloc de notas), se recomienda emplear la función trace con fin y un disparo de flanco positivo para la señal de referencia de a partir del umbral de 1LU.

Ejercicio 4

Comparación de la respuesta temporal del modelo con la medición

Para realizar la comparación, al importar la medición hecha en STARTER en la herramienta tecnológica se debe pasar los datos de tiempo de milisegundos a segundos.

- Comparar la señal de referencia medida $r_{2665}-x(\text{ref})$ medida en el punto anterior con la señal rampa de referencia aplicada en el punto 2 de pendiente de 2500 LU/seg y determinar el retraso de tiempo que existe entre las dos referencias.
- Una vez determinado el tiempo de retraso en el punto anterior, comparar la señal de salida del sistema modelado en el punto 2, con la señal de salida de posición $r_{2521}-x(\text{real})$ obtenida en el punto 3, considerar el tiempo de retraso en la señal de salida $r_{2125}-x(\text{real})$.

Nota: El posicionador simple especifica la velocidad de referencia en LU/min o rev/min, por esta razón para comparar estos datos, se asigna en el punto 2 del modelo una rampa de posición con una pendiente en LU/seg con el fin de obtener en la respuesta del sistema los datos de posición en LU y los de tiempo en segundos, recordando que 150rpm es igual a 150000 LU/min ó 2500 LU/seg)

3.6 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El diseño de cada práctica se implementa tomando como base los resultados expuestos en este capítulo, de acuerdo con los objetivos, materiales y procedimiento se implementó un cuadernillo de prácticas de control lineal a partir de

la estructura diseñada, en el anexo A se presenta el cuadernillo de las prácticas de control lineal con el fin de exponer el diseño final de este trabajo.

4 VALIDACIÓN

Una vez realizado el diseño e implementación de las guías es necesario verificar el diseño coherente de estas, y su utilidad; por lo que fue necesario definir un procedimiento de evaluación que permita valorar estas guías con respecto al aprendizaje adquirido en cada práctica.

4.1 METODOLOGÍA

Para la validación del material didáctico se llevó a cabo el desarrollo de estas prácticas por parte de estudiantes de semestres superiores vinculados a los programas que poseen dentro de su formación académica el aprendizaje de Sistemas de Control Lineal en el Laboratorio de Automática. A partir de este desarrollo se le pide al estudiante llenar una encuesta con el fin de evaluar los distintos aspectos relacionados con estas prácticas. El número de estudiantes a desarrollar las prácticas son cinco (5) los cuales se seleccionaron voluntariamente y se dividieron en tres grupos (1 grupo de 1 y 2 grupos de 2). La estructura de las prácticas es igual para todas por lo que tienen un mismo protocolo de desarrollo, de modo se realizó la evaluación de las tres primeras prácticas con el fin de verificar la validez de este trabajo de grado a partir de las encuestas hechas a los estudiantes.

4.2 FORMULARIO DE ENCUESTA

Para evaluar la herramienta didáctica, se empleó como base el formulario de encuesta a estudiantes para los recursos físicos remotos, generado en el proyecto (Ramírez Scarpetta et al., 2011) mediante metodologías de aprendizaje activos (ver anexo C). En este formulario se evalúa el nivel de cumplimiento de los diferentes aspectos relacionados con el diseño e implementación de estos recursos, como son los aspectos del laboratorio, del aprendizaje y del desarrollo de habilidades transversales.

Considerando principalmente que el material didáctico es un recurso físico (guías) que permite la experimentación en la plataforma con el objetivo de lograr un aprendizaje en Sistemas de Control Lineal, las preguntas de la encuesta están orientadas a las prácticas implementadas de Sistemas de Control Lineal para el Servomecanismo UV y no a los recursos físicos remotos que estudian en sistemas de control no lineales en los cuales se enfoca el formulario, de modo que fue necesario ajustar este formulario orientándolo al material que se deseaba validar, a continuación se presenta el formulario.

  Universidad del Valle Grupo de Investigación en Control Industrial	Encuesta a Estudiantes	Versión: 01 10/04/2015
	PRÁCTICAS DE CONTROL LINEAL PARA EL SERVOMECANISMO UV	

Fecha: ___/___/___ Asignatura: _____

Seleccione la calificación que mejor describa **el nivel de cumplimiento** de la afirmación correspondiente de acuerdo con la tabla:

1 No se cumple	2 Bajo	3 Medio	4 Alto	5 Muy Alto
----------------	--------	---------	--------	------------

Aspectos del Laboratorio	1	2	3	4	5
Cree usted que:					
1. El material de instrucción maneja un lenguaje claro y sencillo que facilitar la comprensión del uso de plataforma.					
2. Las herramientas disponibles en la plataforma son fáciles de operar y utilizar.					
Del Aprendizaje	1	2	3	4	5
Las herramientas de la plataforma facilitaron la comprensión de conceptos en temas como:					
3. Reconocer el proceso de regulación de velocidad del Servomecanismo UV y desarrollar competencias para su operación en el modo regulación de Velocidad con encóder					
4. Adquirir competencias para analizar el desempeño estático y dinámico del sistema y a partir de esta información obtener el modelo matemático					
5. Analizar el comportamiento dinámico y la estabilidad del sistema a partir del efecto de la variación de uno de sus parámetros del lazo de control					
6. Comprender la representación y el comportamiento de la respuesta en frecuencia del Sistema de control de velocidad del Servomecanismo UV					
7. Comprender el análisis y ajuste de las acciones de control P y PI del lazo de control de velocidad del Servomecanismo UV					
8. Realizar el diseño del controlador PI del lazo de control de velocidad del Servomecanismo UV a partir de especificaciones de diseño por medio de los criterios de magnitud y ángulo del lugar geométrico de las Raíces.					
9. Adquirir habilidades en la operación y manejo del Servomecanismo UV para la función de regulación de posición y de posicionador simple (PosS) del Sinamics S110					
10. Comprender la estructura del sistema dinámico de control de posición del servomecanismo.					
Del desarrollo de habilidades transversales	1	2	3	4	5
Las herramientas de la plataforma fortalecieron mi capacidad para:					
11. Aplicar el conocimiento a la práctica					
12. Gestionar el tiempo y la información					
13. El autoaprendizaje					
14. Tomar decisiones					
15. Ser recursivo y creativo					
16. Resolver problemas					

Sugerencias: _____

4.3 RESULTADOS

Para el desarrollo de cada práctica se considera que a los practicantes no se les exigirá el preinforme ni el informe debido a que el propósito principal de la validación está orientado a verificar los objetivos, materiales, marco teórico y procedimiento definido en los resultados de este trabajo de grado y además, no se consideran los ítems 6,7,8,9 y 10. De modo que los resultados de la validación de la construcción de las guías de laboratorio de Sistemas de Control Lineal para el servomecanismo UV se basan en las encuestas realizadas por los estudiantes, una vez finalizada cada práctica, se presentan las valoraciones de cada práctica, las cuales se encuentran en el anexo D del presente documento.

Tabla 8. Encuesta Grupo 1

Grupo 1			
	Nivel de Cumplimiento		
	Aspectos del Laboratorio	Del Aprendizaje	Del desarrollo de habilidades transversales
Nivel de Cumplimiento	4,5	4,833	5

Sugerencias: En comparación con las prácticas anteriores y al ser un tema interesante, se sugiere procurar enfatizar en las técnicas de identificación mediante los métodos de control P, esto permite enriquecer las herramientas necesarias para la resolución de problemas en un proceso industrial.

Tabla 9. Encuesta Grupo 2

Grupo 2			
	Nivel de Cumplimiento		
	Aspectos del Laboratorio	Del Aprendizaje	Del desarrollo de habilidades transversales
Nivel de Cumplimiento	5	4,833	4,33

Sugerencias: El contenido de las guías es claro y conciso, si se cumple con el objetivo de las mismas, es posible aterrizar los conocimientos obtenidos en la clase teórica de manera eficiente.

Tabla 10. Encuesta Grupo 3

Grupo 3			
	Nivel de Cumplimiento		
	Aspectos del Laboratorio	Del Aprendizaje	Del desarrollo de habilidades transversales
Nivel de Cumplimiento	4,5	5	4,66

Sugerencias: Las guías de las prácticas explican en detalle las actividades que se deben realizar. Es importante que los estudiantes precisen más en el uso del software matemático para que el desarrollo de la práctica sea más eficiente.

4.3.1 Discusión de resultados

Para analizar los resultados obtenidos en las encuestas a los estudiantes a través del formulario de evaluación propuesto, se hace una media de las calificaciones (nivel de cumplimiento) de cada grupo evaluado y su respectiva discusión.

En los aspectos de laboratorio se obtuvo un nivel de cumplimiento en promedio de 4,66, indicando que el material de instrucción maneja un lenguaje claro y comprensible y las herramienta disponibles en la plataforma son fáciles de operar y utilizar. En los aspectos del aprendizaje se obtuvo un nivel de cumplimiento en promedio de 4,88, indicando que los conceptos expuestos en cada tema o práctica a trabajar son de comprensión fácil, permitiendo cumplir con el objetivo de cada tema. En los aspectos de desarrollo de habilidades transversales se obtuvo un nivel de cumplimiento en promedio de 4,66, indicando que la herramienta diseñada permite aplicar los conocimientos teóricos en la práctica, gestionar el tiempo e información, el autoaprendizaje, la toma de decisiones, la creatividad y la solución de problemas.

Considerando que la nota media en todos los aspectos mencionados anteriormente es superior a 4.66, el **nivel cumplimiento** del diseño del material didáctico con fines de aprendizaje en Sistemas Automáticos de control Lineal utilizando el Servomecanismo UV se encuentra entre Alto y Muy Alto, permitiendo validar el material construido.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

En el proceso de construcción de guías experimentales para aprendizaje en Ingeniería en especial en la Universidad del Valle y la escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, se concluye que existe gran dificultad en implementar guías de carácter constructivo o de estrategia pedagógica activa en los laboratorios, ya que se debe considerar que el aprendizaje práctico o experimental en este contexto busca crear conductas a los futuros profesionales con el fin de crear aptitudes o destrezas en el ámbito profesional, de modo que se debe dar instrucciones precisas de operación de los diferentes equipos que se cuentan como materiales o plataformas de experimentación e instrucciones precisas de procedimiento para permitir validar los conceptos teóricos aprendidos, lo que hace necesario crear un material tipo conductista.

En el proceso de construcción de guías de laboratorio de Sistemas de Control utilizando la plataforma de experimentación, se tiene en cuenta que debido al carácter industrial de este equipo, es necesario modificar la forma en que se viene realizando el aprendizaje experimental en Sistemas de Control Lineal para las plataformas que se han estudiado anteriormente, especialmente se debe hacer un ajuste de las técnicas de identificación y modelados de procesos dinámicos, ya que estas plataformas anteriores se crearon con el propósito de enseñar a diferencia de la plataforma de Servomecanismo UV la cual se diseñó con un propósito industrial.

Considerando la tecnología, el principio de funcionamiento y las habilidades en el manejo de esta plataforma, las guías de aprendizaje se construyeron escogiendo solo la unidad de control CU305 como controlador, de modo que las prácticas de estructuras de Controladores cascada, serie paralelo, por realimentación de estados y de estructuras de control RST realizadas con los servomecanismo actuales del área de automática, no son posibles de realizar debido a topología del sistema de control o de las estrategias de control implementadas en la unidad de control CU305 del accionamiento Sinamics S110.

Debido a las limitaciones estructurales de la plataforma (industrial) fue necesario desarrollar el procedimiento a partir del Sistema de Control de lazo cerrado. Esto permite llevar al laboratorio de sistemas de control un problema que se puede presentar en el campo laboral en el que se encuentren sistemas de control que no permiten abrir sus lazos de regulación, y enriquecer los métodos de identificación de procesos empleados hasta ahora en este laboratorio (métodos de identificación de lazo abierto).

5.2 TRABAJOS FUTUROS

Se propone como trabajo futuro realizar la construcción de guías de laboratorio de Sistemas de Control Lineal para el Servomecanismo UV, empleando como controlador superior o maestro el PLC S7300 y como controlador inferior o esclavo la unidad de control CU305.

Se recomienda implementar las guías en un curso con al menos dos grupos que permitan evaluar todas las prácticas y realizar los ajustes que sean necesarios.

Se propone realizar la construcción de guías de aprendizaje experimental que permitan desarrollar aplicaciones de procesos de tipo industrial para el Servomecanismo UV.

BIBLIOGRAFÍA

- Alemán, J. D., & Mata, M. A. (2006). Manual de prácticas de laboratorio, taller o campo: Asignaturas teórico prácticas. Universidad Autonoma de Chapingo, México.
- Alfaro, M. M. (2001). Identificación de Procesos sobrearmortiguados utilizando tecnicas de lazo abierto. Fecha de consulta: Enero de 2015. Recuperado de http://www.researchgate.net/profile/Victor_Alfaro/publication/260058479_Identificacin_de_procesos_sobrearmortiguados_utilizando_tcnicas_de_lazo_cerrado/links/00b7d52f3b76145ef3000000.pdf.
- Caicedo Bravo, E. F., & Ramírez Scarpetta, J. M. (2004). *Plataforma para Instrumentación Industrial*. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Caicedo C., C. E. (2014). *Plataforma de experimentación con servomecanismos para propósitos de educación en Automatización y Control*. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Cortés R., J. A., & Rengifo O., D. A. (2011). *Diseño de un módulo didáctico de accionamientos para máquinas de Inducción*. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Delgado S., C. A. (2008). *Diseño y construcción de un Prototipo de laboratorio remoto y virtual para educación en Fundamentos de control usando herramientas de libre Distribución*. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Díaz Paz, J.-P. (2015a). Lugar Geométrico de las Raíces. Guía de Laboratorio. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Díaz Paz, J.-P. (2015b). Modelado de sistemas dinámicos y respuesta en el tiempo. Guía de Laboratorio. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Díaz Paz, J.-P. (2015c). Respuesta en Frecuencia. Guía de Laboratorio. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- EIEE. (n.d.). Práctica 1 Software Quartus II y Funciones Lógicas 1. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.

- Electrónica, L. (n.d.). *Aplicaciones no lineales del Amplificador Operacional*. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Emilia, F., & Buitrago, C. (2013). *Las prácticas de laboratorio como con énfasis en medio ambiente*. Instituto de Educación y Pedagogía -Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- En, D. E. Q., & Nivel, E. L. (1996). Elaboración de guías de actividades para el laboratorio de química en el nivel universitario, (1994). Fecha de consulta: Marzo de 2015. Recuperado de <http://apice.webs.ull.es/pdf/432-017.pdf>.
- Frecuencia y Velocidad. (n.d.). Sinamics S110. Fecha de consulta: Octubre de 2014. Recuperado de <http://www.frecuenciayvelocidad.com/productos/servocontroles/sinamic-s110>.
- González, P. A. (2009). Prácticas de laboratorio como investigación científica mediante aprendizaje cooperativo, (1), 1–9. Fecha de consulta: Marzo de 2015. Recuperado de http://giac.upc.es/JAC10/09/Doc_42.pdf.
- Konstenko, M., & Piotrovski, L. M. (1973). *Máquinas eléctricas Vol. 1*. (Mir., Ed.). Moscú.
- Kuo, B. (1996). *Sistemas de Control Automatico.pdf*. (P. Hall, Ed.). México.
- Laboratorio 1 características básicas del amplificador operacional*. (2013). Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Levine, W. S. (1996). *The Control Handbook*. (J. P. House, Ed.). Florida. Fecha de consulta: Diciembre de 2014. Recuperado de <http://www.amazon.fr/Control-Handbook-William-S-Levine/dp/0849385709>.
- López, a., & Tamayo, O. (2012). Las prácticas de laboratorio en la enseñanza de las ciencias naturales. *Latinoamericana de Estudios Educativos*, 8. Fecha de consulta: Marzo de 2015. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/1341/134129256008.pdf>
- Mansilla, J. M. (2011). Variadores de velocidad y arrancadores electrónicos. Fecha de consulta: Octubre de 2014. Recuperado de https://conbotassucias.files.wordpress.com/2011/08/variadores-de-velocidad_jmmc.pdf
- Medición de la potencia trifásica y El factor de potencia*. (n.d.). Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.

- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Vasa. Pretince Hall. Fecha de consulta: Febrero de 2015. Recuperado de <http://www.fiuxy.com/ebooks-gratis/3313306-ingenieria-de-control-moderna-5-edicion-ogata-pdf-ebook-multihost.html>.
- Plazas, R. (2014a). Ajuste de controladores PID. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Plazas, R. (2014b). Estabilidad y Lugar Geométrico de las Raíces. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Ram, M., Emilio, E., Garc, R., & Valle, U. D. E. L. (2008). *Sistemas de Control II*. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Ramírez, J. M. (2014). *Sistemas de Control Enfoque de Proyecto*. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Ramírez Scarpetta, J. M. (2008). Plataforma de Procesamiento Distribuido, con acceso remoto multiusuario y emulación de sistemas dinámicos para investigación y educación en ingeniería. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Ramírez Scarpetta, J. M., Franco Mejia, E., & Fernandez Samacá, L. (2011). Entorno de Aprendizaje Basado en Proyectos para Sistemas de Control. Santiago de Cali.
- Ruiz, V. (2011). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores. *Revista Ingeniería*, 12(2), 21–36. Fecha de consulta: Febrero de 2015. Recuperado de <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/viewFile/6430/6135>.
- Siemens. (2011a). SIMATIC S7-300: the modular universal controller for the manufacturing industry. Fecha de consulta: Septiembre de 2014. Recuperado de <http://w3.siemens.com/mcms/programmable-logic-controller/en/advanced-controller/s7-300/pages/default.aspx>.
- Siemens. (2009). Catalogo PM22 Sinamics S1110. Fecha de consulta: Septiembre de 2014. Recuperado de http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/katalogy/pm22/cat_pm-22_2009_en.pdf.
- Siemens. (2010). Sinamics s110 Manual de funciones. Fecha de consulta: Septiembre de 2014. Recuperado de

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/730/34017730/att_90754/v1/FH3_052010_es.pdf.

Siemens. (2011b). Motores síncronos 1FK7 Instrucciones de servicio. Fecha de consulta: Octubre de 2014. Recuperado de https://cache.industry.siemens.com/dl/files/753/48983753/att_109809/v1/1FK7-es-ES.pdf.

Siemens. (2012). Sinamics s110 Manual de Listas. Fecha de consulta: Septiembre de 2014. Recuperado de https://cache.industry.siemens.com/dl/files/674/62999674/att_90626/v1/LH7_0612_esp.pdf.

Siemens. (2013). PC Adapter USB A2. Fecha de consulta: Diciembre de 2014. Recuperado de https://cache.industry.siemens.com/dl/files/363/68849363/att_62092/v1/BA_P_C-Adapter-USB-A2_76.pdf.

SINAMICS S110. (2011). Manual de producto. Fecha de consulta: Septiembre de 2014. Recuperado de https://cache.industry.siemens.com/dl/files/218/49086218/att_74431/v1/GH8_0111_esp-es-ES.pdf.

Smith, C., & Corripio, A. (1997). *Principles and Practice of Automatic Process Control*. (J. W. & S. Inc, Ed.).

Universidad del Valle. (n.d.). *Práctica N° 3 determinación de la secuencia de fase mediante el método de las 2 lámparas*. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.

Universidad del Valle. (2012). *Acciones Básicas de Control*. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.

Universidad del Valle. (n.d.). *Medición de potencia monofásica*. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.

Universidad del Valle. (2014). *Modelado de Sistemas de primer orden y segundo orden*. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali.

Valverde, J., Jiménez, L., & Viza, L. (2006). *La Atención a La Diversidad en las prácticas le laboratorio de Química : Los Niveles de abertura*. Marzo de 2015. Recuperado de <http://www.raco.cat/index.php/ensenanza/article/viewFile/73532/84740>.

ANEXOS

Anexo A. Prácticas de Control Lineal para el Servomecanismo UV

El cuadernillo de prácticas de control lineal para el Servomecanismo UV se encuentra en la carpeta ANEXO A del CD adjunto.

Anexo B. Manual de operación para el control de velocidad y posición del Servomecanismo UV utilizando STARTER

El manual de operación para el control de velocidad y posición del Servomecanismo UV se encuentra en la carpeta ANEXO B del CD adjunto.

Anexo C. Formulario recursos físicos remotos

 	Encuesta a Estudiantes	Versión: 01	30/09/2014
	RECURSOS FÍSICOS REMOTOS		

Periodo Evaluado: _____ Fecha: _____

Asignatura: _____ Nombre del docente: _____

Nombre _____ del _____ Recurso: _____

Seleccione la calificación que mejor describa **el nivel de cumplimiento** de la afirmación correspondiente de acuerdo con la tabla:

5 Muy Alto
4 Alto
3 Medio
2 Bajo
1 No se cumple

Aspectos del Laboratorio Remoto	1	2	3	4	5
Cree usted que:					
17. La programación de los horarios para acceder a las plataformas remotas es conveniente.					
18. El material de instrucción maneja un lenguaje claro y sencillo para facilitar la comprensión del uso de las plataformas remotas.					
19. La visualización de la operación de las plataformas remotas y los datos obtenidos están disponibles en formatos que facilitan su análisis y la elaboración de informes.					
20. Las herramientas disponibles en la plataforma son fáciles de operar y utilizar.					
21. La velocidad de respuesta ante comandos de las plataformas remotas fue apropiada durante las prácticas.					
Del Aprendizaje	1	2	3	4	5
Las herramientas de la plataforma facilitaron la comprensión de conceptos en temas como:					
22. El modelado de los sistemas a partir del modelo no lineal					
23. La linealización de modelos y el análisis de estabilidad					
24. El diseño de controladores					
25. La identificación experimental					
Del desarrollo de habilidades transversales	1	2	3	4	5
Las herramientas de la plataforma fortalecieron mi capacidad para:					

26. Aplicar el conocimiento a la práctica					
27. Gestionar el tiempo y la información					
28. El autoaprendizaje					
29. Tomar decisiones					
30. Ser recursivo y creativo					
31. Resolver problemas					

Sugerencias: _____

Anexo D. Encuestas realizadas a los estudiantes a partir del formulario de evaluación propuesto para la validación de las prácticas experimentales.

Grupo 1

 	Encuesta a Estudiantes	Versión: 01	18/04/2015
	PRÁCTICAS DE CONTROL LINEAL PARA EL SERVOMECHANISMO UV		

Fecha: 18/05/2015 Asignatura: Laboratorio de control

Seleccione la calificación que mejor describa **el nivel de cumplimiento** de la afirmación correspondiente de acuerdo con la tabla:

1 No se cumple	2 Bajo	3 Medio	4 Alto	5 Muy Alto
----------------	--------	---------	--------	------------

Aspectos del Laboratorio	1	2	3	4	5
Cree usted que:					
1. El material de instrucción maneja un lenguaje claro y sencillo para facilitar la comprensión del uso de plataforma.					x
2. Las herramientas disponibles en la plataforma son fáciles de operar y utilizar.				x	
Del Aprendizaje	1	2	3	4	5
Las herramientas de la plataforma facilitaron la comprensión de conceptos en temas como:					
3. Reconocer el proceso de regulación de velocidad del Servomecanismo UV y desarrollar competencias para su operación en el modo regulación de Velocidad con encóder					x
4. Adquirir competencias para analizar el desempeño estático y dinámico del sistema y a partir de esta información obtener el modelo matemático					x
5. Analizar el comportamiento dinámico y la estabilidad del sistema a partir del efecto de la variación de uno de sus parámetros del lazo de control				x	
6. Comprender la representación y el comportamiento de la respuesta en frecuencia del Sistema de control de velocidad del Servomecanismo UV					
7. Comprender el análisis y ajuste de las acciones de control P y PI del lazo de control de velocidad del Servomecanismo UV					
8. Realizar el diseño del controlador PI del lazo de control de velocidad del Servomecanismo UV a partir de especificaciones de diseño por medio de los criterios de magnitud y ángulo del lugar geométrico de las Raíces.					
Del desarrollo de habilidades transversales	1	2	3	4	5
Las herramientas de la plataforma fortalecieron mi capacidad para:					
9. Aplicar el conocimiento a la práctica					x
10. Gestionar el tiempo y la información					x
11. El autoaprendizaje					x
12. Tomar decisiones					x
13. Ser recursivo y creativo					x
14. Resolver problemas					x

Sugerencias: En comparación con las prácticas anteriores y al ser un tema interesante, se sugiere procurar enfatizar en las técnicas de identificación mediante los métodos de control P, esto permite enriquecer las herramientas necesarias para la resolución de problemas en un proceso industrial.

Grupo 2

 Universidad del Valle	 Grupo de Investigación en Control Industrial	Encuesta a Estudiantes	Versión: 01	18/04/2015
PRÁCTICAS DE CONTROL LINEAL PARA EL SERVOMECHANISMO UV				

Fecha: 20/05/2015 Asignatura: Laboratorio de control

Seleccione la calificación que mejor describa **el nivel de cumplimiento** de la afirmación correspondiente de acuerdo con la tabla:

1 No se cumple	2 Bajo	3 Medio	4 Alto	5 Muy Alto
----------------	--------	---------	--------	------------

Aspectos del Laboratorio	1	2	3	4	5
Cree usted que:					
1. El material de instrucción maneja un lenguaje claro y sencillo para facilitar la comprensión del uso de plataforma.					X
2. Las herramientas disponibles en la plataforma son fáciles de operar y utilizar.					X
Del Aprendizaje	1	2	3	4	5
Las herramientas de la plataforma facilitaron la comprensión de conceptos en temas como:					
3. Reconocer el proceso de regulación de velocidad del Servomecanismo UV y desarrollar competencias para su operación en el modo regulación de Velocidad con encóder				X	
4. Adquirir competencias para analizar el desempeño estático y dinámico del sistema y a partir de esta información obtener el modelo matemático					X
5. Analizar el comportamiento dinámico y la estabilidad del sistema a partir del efecto de la variación de uno de sus parámetros del lazo de control					X
6. Comprender la representación y el comportamiento de la respuesta en frecuencia del Sistema de control de velocidad del Servomecanismo UV					
7. Comprender el análisis y ajuste de las acciones de control P y PI del lazo de control de velocidad del Servomecanismo UV					
8. Realizar el diseño del controlador PI del lazo de control de velocidad del Servomecanismo UV a partir de especificaciones de diseño por medio de los criterios de magnitud y ángulo del lugar geométrico de las Raíces.					
Del desarrollo de habilidades transversales	1	2	3	4	5
Las herramientas de la plataforma fortalecieron mi capacidad para:					
9. Aplicar el conocimiento a la práctica					X
10. Gestionar el tiempo y la información					X
11. El autoaprendizaje					X
12. Tomar decisiones				X	
13. Ser recursivo y creativo				X	
14. Resolver problemas					X

Sugerencias: El contenido de las guías es claro y conciso, si se cumple con el objetivo de las mismas, es posible aterrizar los conocimientos obtenidos en la clase teórica de manera eficiente.

Grupo 3

		Encuesta a Estudiantes	Versión: 01	18/04/2015
PRÁCTICAS DE CONTROL LINEAL PARA EL SERVOMECANISMO UV				

Fecha: 24/05/2015 Asignatura: Laboratorio de control

Seleccione la calificación que mejor describa **el nivel de cumplimiento** de la afirmación correspondiente de acuerdo con la tabla:

1 No se cumple	2 Bajo	3 Medio	4 Alto	5 Muy Alto
----------------	--------	---------	--------	------------

Aspectos del Laboratorio	1	2	3	4	5
Cree usted que:					
1. El material de instrucción maneja un lenguaje claro y sencillo para facilitar la comprensión del uso de plataforma.					X
2. Las herramientas disponibles en la plataforma son fáciles de operar y utilizar.				X	
Del Aprendizaje	1	2	3	4	5
Las herramientas de la plataforma facilitaron la comprensión de conceptos en temas como:					
3. Reconocer el proceso de regulación de velocidad del Servomecanismo UV y desarrollar competencias para su operación en el modo regulación de Velocidad con encóder					X
4. Adquirir competencias para analizar el desempeño estático y dinámico del sistema y a partir de esta información obtener el modelo matemático					X
5. Analizar el comportamiento dinámico y la estabilidad del sistema a partir del efecto de la variación de uno de sus parámetros del lazo de control					X
6. Comprender la representación y el comportamiento de la respuesta en frecuencia del Sistema de control de velocidad del Servomecanismo UV					
7. Comprender el análisis y ajuste de las acciones de control P y PI del lazo de control de velocidad del Servomecanismo UV					
8. Realizar el diseño del controlador PI del lazo de control de velocidad del Servomecanismo UV a partir de especificaciones de diseño por medio de los criterios de magnitud y ángulo del lugar geométrico de las Raíces.					
Del desarrollo de habilidades transversales	1	2	3	4	5
Las herramientas de la plataforma fortalecieron mi capacidad para:					
9. Aplicar el conocimiento a la práctica					X
10. Gestionar el tiempo y la información				X	
11. El autoaprendizaje					X
12. Tomar decisiones					X
13. Ser recursivo y creativo				X	
14. Resolver problemas					X

Sugerencias: las guías de las prácticas explican en detalle las actividades que se deben realizar. Es importante que los estudiantes precisen más en el uso del software matemático para que el desarrollo de la práctica sea más eficiente.