

ColloQUIUM

Editorial - Centro de Formación

Laboratorios Virtuales para la enseñanza de Sistemas Avanzados de Control, en Minería y Petróleo

José Leonardo Benavides Maldonado

Diego Eduardo Jara Delgado

Vilma Estefania Salinas Nalvay

Manuel Augusto Pesantez Gonzalez





José Leonardo Benavides Maldonado

<https://orcid.org/0000-0003-4553-0577>

jose.benavides@unl.edu.ec / josephle2004@yahoo.es

Ingeniero en Electromecánica por la UNL, Máster en Automática y Sistemas Informáticos por la UCLV-Cuba. Doctor en Ciencias por el ICIMAF-Cuba, -Docente en la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la UNL.



Diego Eduardo Jara Delgado

<https://orcid.org/0000-0001-9518-4655>

diego.jara@unl.edu.ec / diegojarae@yahoo.es

Mg.Sc. Docencia Universitaria e Investigación Educativa e. Ingeniero Químico Docente Titular en la Universidad Nacional de Loja. UNL, en las Carrera de Ingeniería en Geología Ambiental y Ordenamiento Territorial e Ingeniería en Minas, e impartiendo las asignaturas de Metodología e Investigación. Científica, Química, Geoestadística, Mecánica de Fluidos y Ecuaciones Diferenciales.

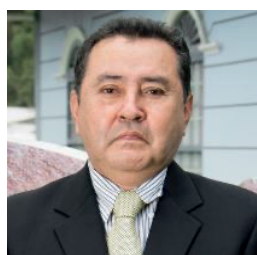


Vilma Estefania Salinas Nalvay

<https://orcid.org/0000-0002-7872-6990>

vesalinasn@unl.edu.ec / stefysn1990@gmail.com

Ingeniera en Sistemas, Máster en Tecnología Educativa y Competencias Digitales. Docente en Informática Educativa y directora de la Comisión Técnico Pedagógica del “Colegio de Técnico Chaguarpamba”, Ministerio de Educación, Zona 7/Distrito 11D02 Catamayo-Olmedo-Chaguarpamba



Manuel Augusto Pesantez Gonzalez

Universidad Nacional de Loja

<https://orcid.org/0000-0002-8521-7078>

manuel.pesantez@unl.edu.ec

<https://scholar.google.es/citations?user=gnQuMSsAAAAJ&hl=es>

Ingeniero en electricidad, especialización en electrónica (ESPOL-GUAYAQUIL - ECUADOR), Magister en Teledetección en la Universitat de Valencia (España), doctorando en Teledetección, docente titular en la Universidad Nacional de Loja (UNL- LOJA- Ecuador), 2017 hasta presente fecha, ex docente universitario en la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE), 2014-2016, ex jefe técnico del Instituto Ecuatoriano de Telecomunicaciones (IETEL – LOJA - ECUADOR),1990-1994, diseñador constructor redes eléctricas, EERSSA, Investigador en el proyecto; caracterización de la potencialidad solar y eólica en la región sur del Ecuador (CAPESESE) años 2019-2021 en la UNL, 10 años de trabajo profesional en Madrid-España en empresas como CAMIFE, REDAI-ELECTRONIC, SDEM TEGA, PROSEGUR, TECONOCONTROL, 2000-2010.

**Laboratorios Virtuales para
la enseñanza de Sistemas Avanzados
de Control, en Minería y Petróleo**

**José Leonardo Benavides Maldonado
Diego Eduardo Jara Delgado
Vilma Estefania Salinas Nalvay
Manuel Augusto Pesantez Gonzalez**

Collo**QUIUM**

Editorial - Centro de Formación

Laboratorios Virtuales para
la enseñanza de Sistemas Avanzados
de Control, en Minería y Petróleo

José Leonardo Benavides Maldonado
Diego Eduardo Jara Delgado
Vilma Estefania Salinas Nalvay
Manuel Augusto Pesantez Gonzalez

Edited by Colloquium
ISBN: 978-9942-600-07-3
First edition 2021

The book was reviewed by academic peers before its editorial process, in case you require certification you should request it to: sbores@colloquium-editorial.com.

The production or storage of all or part of this publication, including the cover design, as well as its transmission by any means, whether electronic, chemical, mechanical, optical, recording or photocopying, without the authorization of the copyright holders, is strictly prohibited under the penalties of the law.

Ecuador 2021

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. C. Abelardo del Pozo Quintero, que continuo con la tutoría, a la Dra. Iliana Dopico y Dr. Armando Plasencia, que me brindaron sus recomendaciones y sugerencias en cada uno de los momentos más fuertes en el desarrollo de este libro, a todos ellos gracias.

DEDICATORIA

A todos nuestros familiares

PENSAMIENTO

´Para ir delante de los demás, se necesita ver más que ellos.´

José Martí

´La ciencia es el alma de la prosperidad de las naciones y la fuente de todo progreso.´

Louis Pasteur

RESUMEN

La economía del Ecuador se basa principalmente en la explotación de los recursos minerales que posee el país; el cobre y el petróleo. Es por ello que cualquier investigación, desarrollo de tecnologías o metodologías que contribuyan a la formación de especialistas en estas áreas, puede considerarse una condición y un resultado relevante para el desarrollo científico del país. Los laboratorios en línea se aplican cada vez más en el ámbito universitario, para la enseñanza-aprendizaje e investigación en diferentes áreas de la ingeniería, especialmente en temáticas de control automático y simulación de procesos virtuales y/o remotos.

En el presente libro se propone la implementación de un laboratorio en línea para la enseñanza del control automático en la Universidad Nacional de Loja, para lo cual se ha diseñado una metodología a utilizar, a modo de ejemplo, en dos actividades prácticas específicas en las cuales se diseñan, de forma novedosa, sus módulos sobre la plataforma Moodle. La primera actividad práctica implementada, como propuestas, en el laboratorio en línea consiste en desarrollar un prototipo a escala de laboratorio de la trituración de cobre. Con este prototipo se logró una patente en Ecuador, se eligió el proceso de trituración de toda la cadena para la obtención del cobre, porque consume el 9,87 % de la energía que se emplea en toda la planta. Por tanto, en este trabajo se propone lograr un aumento de su eficiencia mediante las técnicas de control automático como son: el clásico PID, MPC, LQR y PS.

La segunda actividad práctica del laboratorio virtual consiste en la simulación y el control de una columna de destilación binaria, particularmente, la destilación de petróleo crudo. En esta práctica se comparan técnicas de control avanzado como son: LQR, Lógica Difusa. Con esta práctica se pretende que el estudiante comprenda un proceso que en la realidad es muy complejo y cuya simulación se logró con los datos de un

congreso IFAC. Los cálculos y resultados obtenidos con estos datos se muestran en anexos.

LISTADO DE ABREVIATURAS

$e(t)$: error o representación del ruido blanco.

Kp : ganancia proporcional

Ki : ganancia integral

Kt : ganancia derivativa

(μ) : funciones de pertenencia

MPC : Modelos Predictivos de Proceso

MFC : MacroLaboratorio de Formación Conjunta

LQR : Regulador Lineal Cuadrático

$r(t)$: valor deseado

UNL : Universidad Nacional de Loja

$up(t)$: salida del controlador tipo paralelo

$us(t)$: salida del controlador tipo serie

$y(t)$: variable controlada

Kcp : ganancia, controlador paralelo

Tip : tiempo integral, controlador paralelo

Tdp : tiempo derivativo, controlador paralelo

Kcs : ajuste proporcional, controlador serie

Tis : ajuste integral, controlador serie

Tds : ajuste derivativo, controlador serie

Kd selector: acción derivativa ($Kd = 0$ o 1)

Kr: factor de peso del valor deseado ($0 \leq Kr \leq 1$)

αd : constante del filtro derivativo, ($0,05 \leq \alpha d \leq 0,20$), normalmente, es fijado por el fabricante en 0.1

τf : constante de tiempo, filtro *PID-IMC*

τr : **constante** de tiempo, filtro del valor deseado

p: operador derivada (d/dt)

\hat{y} : Salida predictiva

MATLAB®/Simulink: MATrix LABoratory

UNL: Universidad Nacional de Loja

ICIMAF: Instituto de Cibernética Matemática y Física

IFAC: International Federation of Automatic Control, Federación de Control Automático.

CADCS: Computer Aided Design for Control System

SAG: Molino semiautógeno

LV: Laboratorios Virtuales

SLD: Sistema de Laboratorios a Distancia

EVA: Entorno de Realidad Virtual de Aprendizaje

TIC: Las tecnologías de la información y Comunicación

Índice

<i>AGRADECIMIENTOS</i>	2
<i>DEDICATORIA</i>	4
<i>PENSAMIENTO</i>	5
<i>RESUMEN</i>	6
<i>LISTADO DE ABREVIATURAS</i>	8
<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
<i>CAPÍTULO I</i>	5
<i>MARCO TEORICO CONCEPTUAL</i>	5
<i>1.3 Automatización del proceso de trituración</i>	21
<i>1.3.1 Posibilidades que brinda el uso de laboratorios virtuales</i>	21
<i>1.3.2 Identificación de modelos de procesos mineros</i>	23
<i>1.3.3 Laboratorios virtuales, usando algoritmos de control</i>	24
<i>1.3.4 Automatización de las bandas transportadoras en la minería</i>	27
<i>1.3.5 Retos y logros que se deben conseguir al simular y controlar a distancia en el laboratorio virtual</i>	29
<i>1.4 Sistemas de control aplicados a circuitos de Molienda</i> ..	30
<i>1.4.1 Control del proceso de trituración, usando sistemas inteligentes</i>	33
<i>1.5 Estado actual de la automatización en procesos de destilación de mezclas binarias y su adaptación para la enseñanza en laboratorios virtuales</i>	34

1.5.1 Columna de destilación binaria	36
1.5.2 Concentración de una mezcla binaria.....	36
1.5.3 Sistemas de control aplicados en Instalaciones de Petróleo.....	38
1.6 Aplicaciones con sistemas inteligentes.....	39
1.6.1 Lógica Difusa	40
1.6.2 Sistemas difusos híbridos.....	41
CAPÍTULO II	44
IMPLEMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA VIRTUAL SOBRE MOODLE	44
2.1 Desarrollo e Implementación de Plataformas de laboratorio virtual en la UNL	45
2.1.1 Plataforma virtual desarrollada en la UNL, empleando Moodle y LabVIEW™	46
2.1.2 Laboratorio de Control Automático de la UNL, en tiempo Diferido.....	49
2.1.3 MacroLaboratorio de Formación Conjunta para Sistemas de Control Automático.	50
2.2 Arquitecturas de las prácticas de Trituración y de Columnas de Destilación Binaria.....	53
2.3 Criterios que se consideraron para elegir la Metodología Didáctica	54
2.3.1 Planificación de la clase por competencias.....	55
2.3.2 Práctica de la I y II unidad, en tiempo teórico y simulado, basada en Aprendizaje por competencias.....	58
2.3.3 Práctica de la VII y VIII unidad, en tiempo teórico, simulado y remoto, basada en competencias.....	61
2.3.4 Desarrollo de las competencias en tiempo virtual o simulado de la Trituradora	65

2.3.5 Práctica en tiempo remoto de la Trituradora	67
2.4 Implementación de la práctica de trituración.....	69
2.4.1 Diseño y cálculo del prototipo de trituración	70
2.4.2 Modelado de la Trituradora.....	71
2.4.3 Identificación del modelo de control de la trituradora	71
2.4.4 Entrada de la tarjeta Arduino con una conexión de la celda de carga	73
2.5 Sistema de adquisición y calidad de los datos requeridos	74
2.5.1 Adquisición de datos con Arduino Mega.....	75
2.6 Diseño del Servomecanismo y del controlador	77
2.6.1 Implementación del sistema de control.....	82
2.7 Grado de satisfacción de los alumnos en la utilización del MFC	82
2.7.1 Estudio estadístico aplicado a las prácticas de Trituración y de Columnas de Destilación Binaria (CDB) ..	84
2.7.3 Registros de calificaciones en un período de cuatro años	85
2.7.4 Validación de los resultados obtenidos	86
2.7.4.1 Interpretación de los datos obtenidos del estudio estadístico.....	88
2.8 Conclusiones parciales	91
CAPÍTULO III.....	93
SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO Y METODOLOGÍAS DE TRABAJO A EMPLEAR EN LAS PRÁCTICAS DEL LABORATORIO VIRTUAL.....	93
3.1 Sistema de control automático y metodología de trabajo para la práctica de trituración.....	96

3.1.1 Diseño y ejecución de experimentos preliminares para la identificación	97
3.1.2 Diseño de los experimentos de identificación	100
3.1.3 Análisis de datos en el dominio del tiempo, haciendo uso de la herramienta CADCS	100
3.1.4 Análisis de la auto-correlación.....	100
3.1.5 Análisis de la correlación cruzada	101
3.2 Uso de la herramienta CADCS, para la identificación del sistema.....	103
3.2.1 Aplicación del escalamiento de los datos empleados en el experimento, con la finalidad de reducir el error.	104
3.2.2 Verificación del modelo matemático haciendo uso de la herramienta APPS (aplicaciones de MATLAB®).....	107
3.3 Controlador PID.....	111
3.3.1 Controlador con Predictor de Smith.....	112
3.3.2 Controlador MPC (Modelo de Control Predictivo).....	113
3.3.3 Controlador LQR (Regulador Lineal Cuadrático), aplicado al proceso de Trituración	117
3.4 Conclusiones parciales.....	125
CONCLUSIONES.....	127
RECOMENDACIONES	129
REFERENCIAS.....	130
ANEXOS	151

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la fuerza motriz que provee la innovación tecnológica en beneficio de las empresas mineras de cobre e instalaciones de petróleo del Ecuador, hace imprescindible la fusión entre la universidad y la empresa privada, lo que se puede apreciar en (Mohtadi, C., McAree, O., & Schlosser, 2014). En la presente tesis, para cumplir lo anterior se defiende la idea del empleo de laboratorios virtuales y/o remotos (la primera solamente ve los entornos simulados y la segunda además manipula el proceso) para la enseñanza de la automatización de procesos mineros y petroleros. Una de las plataformas virtuales o remotas más utilizadas es la Plataforma Moodle por ser implementada en software libre, características esenciales para ser seleccionada por el autor para el desarrollo de su propuesta de laboratorios virtuales a utilizar en la enseñanza del control automático.

Esta alternativa permite además vincular a los estudiantes de la Universidad Nacional de Loja (UNL) con otras universidades de Colombia, Chile y Cuba, que participan en el MacroLaboratorio de Formación Conjunta para sistemas de Control Automático (MFC), con la finalidad de aprovechar la experiencia que tienen los especialistas de dichos países en la temática de laboratorios virtuales y/o remotos en el control de procesos. Para el desarrollo de los laboratorios virtuales se tomaron dos procesos muy importantes de la industria:

- Exploración de cobre a cielo abierto en Zamora-Ecuador.
- Proceso de destilación en instalaciones de petróleo.

La cadena del proceso minero de cobre, consta de varias etapas, que inician por la obtención de material de la mina, la trituración, etc. (Bobo, 2008), (Guyot, O., Valery, W., & La Rosa, 2004), (Maerz, 1996). Esta tesis, en su propuesta, se

limita a las trituradoras tipos mandíbula por la sencillez de su diseño, lo que hace más fácil su construcción.

Destacándose que la automatización que se utiliza en la producción minera, tiene como objetivo aumentar la eficiencia y la productividad. Es precisamente esto lo que se ha pretendido lograr con esta investigación, pero a escala de laboratorio, partiendo de la construcción de un prototipo para luego elaborar un modelo matemático del proceso y poder aplicar técnicas de control. Los datos para aplicar el control automático al proceso de trituración se obtendrán a partir de un prototipo a escala de laboratorio, como se demostrará en la presente disertación. Por su parte, el proceso de destilación del petróleo, será abordado a través de columnas de destilación binaria (Mujtaba, 2004), (Wang, Yuan, and Yu, 2005).

Estructura de la memoria escrita de la tesis

La memoria escrita de la tesis consta de una introducción, tres capítulos, conclusiones, bibliografía y anexos.

Primer capítulo: Se plasman los resultados de la revisión bibliográfica sobre los laboratorios virtuales, implementados, utilizando las diferentes plataformas existentes, se muestran las ventajas y desventajas para la formación de los estudiantes en las universidades que utilizan estos medios. Luego se analizan algunas estrategias de control aplicadas a la minería. Finalmente, se evalúan entre los métodos existentes el más apropiado a las condiciones de trabajo, es decir, entre un controlador clásico PID y los controladores avanzados e inteligentes, basados en LQR y Lógica Difusa, respectivamente. Seguidamente, se realizan los ajustes a la formulación matemática para obtener mejores resultados en la regulación de algunos de los parámetros más importantes del proceso de destilación de columnas binaria. En los anexos se muestra la parte teórica de este proceso.

Segundo capítulo: Se presentan las etapas que se definieron para la implementación de un entorno virtual en el laboratorio de automatización de la UNL, usando para esto la plataforma Moodle. Es así, que en una primera etapa se plantea la práctica de un brazo robótico, seguidamente se explica cómo se realiza una práctica en tiempo diferido y con estas dos experiencias que servirán como modelo, se expone la implementación del laboratorio virtual del prototipo de trituración tipo mandíbula y de una columna de destilación binaria.

Para estas dos últimas prácticas se hicieron los respectivos dibujos en SolidWorks que permitieron que se pueda trabajar desde Moodle con una animación en 3D de estos procesos. Destacándose, que solo en tiempo remoto se realiza la práctica de la trituradora.

A continuación, en este capítulo se muestra la metodología de enseñanza-aprendizaje que se aplicaran en las prácticas en tiempo virtual y/o remoto, su arquitectura y los momentos en las que se han van a emplear. Para validar el uso del entorno virtual desarrollado, se presenta información de cómo se realizó la integración del laboratorio virtual de la UNL, con otras universidades en un proyecto que se denomina MFC.

Seguidamente se muestra los resultados obtenidos con los estudiantes y docentes en comparación con el antes y después de usar el laboratorio virtual, es decir, calificaciones de cuatro años de los estudiantes de la materia de Control Automático de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la UNL.

En el tercer capítulo. Se presentan los datos experimentales para poder obtener el modelo matemático, del prototipo de trituración desarrollado, tomando como salida el peso y como entrada la posición. Con toda esta información se usaron las herramientas: Asistente para el Diseño de Sistemas de Control Computer Aided Design and Control Systems (CADCS) e Ident, respectivamente que posee MATLAB®, logrando así obtener

una función de transferencia de primer orden. Se explica cómo se validó el modelo en tiempo real, mediante una interfaz entre Arduino y MATLAB®. Se hace el análisis de la mejor estrategia de control de las cuatro planteadas: PID, Predictor de Smith, MPC, y LQR, para controlar el proceso de trituración, con una tarjeta Arduino, por su bajo costo y fácil programación.

Además, el contenido de dicha práctica del laboratorio virtual se puede apreciar en Anexo D.2.2. Seguidamente, la investigación se enfoca a tratar la destilación de petróleo, (que sería la segunda práctica del laboratorio virtual), pero por lo complejo del proceso como tal, se analiza una simple mezcla binaria y así darle al estudiante y al personal vinculado con este proceso, una gama de alternativas modernas para el control de ciertos parámetros como son: la composición en el tope y en el fondo, la presión en el tope de una columna de destilación binaria, por platos.

La práctica completa de la columna de destilación binaria se presenta como una más del laboratorio en la parte de Anexo E, en este anexo se muestran algunos programas, que permiten encontrar los parámetros deseados de un proceso o compararlos con los obtenidos con programas como el MATLAB®. Finalmente, se presentan las conclusiones a que arribado el autor y se proponen recomendaciones.

A continuación, se referencia la literatura consultada y estudiada y así como los anexos que resultaron de esta investigación.

CAPÍTULO I

MARCO TEORICO CONCEPTUAL

En este capítulo se presentan varias aplicaciones de laboratorios virtuales y remotos, que han sido aplicadas en el ámbito pedagógico y didáctico, en particular en la enseñanza de control automático. Actualmente, los laboratorios virtuales son usados en muchas universidades al constituir una alternativa más dinámica y participativa para perfeccionar y actualizar el proceso de enseñanza-aprendizaje, que en muchos casos todavía mantiene elementos de la enseñanza tradicional. Además, se mencionan las ventajas y desventajas con las que pueden encontrarse tanto estudiantes como docentes al acceder a este sistema, las cuales están fundamentadas por algunos resultados encontrados en la bibliografía.

Partiendo de la revisión de la literatura encontrada sobre el proceso de trituración en la minería de cobre se muestran algunos resultados de los últimos años implementados en dicho proceso y que son importantes a tener en cuenta para el diseño de las prácticas en los laboratorios virtuales. Es por eso que se analizan las ventajas y desventajas de algunas de las estrategias de control que se van a usar en esta investigación como son: PID, Predictor de Smith, MPC y LQR.

Con respecto al proceso de destilación del petróleo, seleccionado como la segunda práctica propuesta para implementarse en laboratorios virtuales, se dan los resultados que arrojó la búsqueda bibliográfica (libros y sitios web) haciendo hincapié en el tipo de torres por platos, que trabajan con mezclas binarias. En anexos se particularizan aún más detalles de este proceso y los algoritmos de control que se emplean para automatizarlo.

Finalmente, se muestran los principios en que están basados los controladores que se emplearon en este trabajo como son: LQR y Lógica Difusa.

1.1 Empleo de laboratorios virtuales en la enseñanza del control automático de procesos industriales

El uso de laboratorios virtuales por parte de los estudiantes de las diferentes carreras en las universidades, es una de las herramientas con que ahora cuentan los docentes para mejorar su pedagogía, mejorándose así su efecto instructivo. La metodología elaborada permite la presencia de indicadores de recopilación y procesamiento de datos sobre el control automático de los procesos de trituración en la minería de cobre y la destilación binaria del petróleo, con el uso de nuevas tecnologías, como un portal web (*sitio web, para acceder al MFC, el cual se explica en detalle más adelante*), con la finalidad de evaluar la automatización de la información basada en su análisis, tabulación, la clasificación e interpretación, así como dicha metodología faculta identificar las variables que permiten aplicar las estrategias de control más adecuadas a los procesos antes señalados. A más de reducir costos de equipamiento al ser parte de una red de laboratorios virtuales con otras universidades como es el caso de esta tesis.

1.1.1 Alcance pedagógico de la educación virtual

La enseñanza a través de los entornos virtuales se ha convertido en una nueva modalidad de aprendizaje en donde intervienen muchos factores humanos, materiales y tecnológicos: estudiantes, profesores, tutores, materiales didácticos (metodologías de la enseñanza, formas de evaluación del conocimiento, etc.), computadoras, software, etc.

En la educación en línea el estudiante debe ir construyendo su conocimiento, lo que favorece a que gane en responsabilidad, independencia, creatividad, sea crítico. Además, esta alternativa posibilita, cuando sea necesario, el trabajo en colaboración con otras personas, la retroalimentación y el intercambio de saberes. Por eso es importante el uso de foros que permiten la interacción entre estudiantes; de los wikis para construir definiciones, cuestionarios, tareas, etc. de acuerdo con las opiniones de cada uno de ellos.

Otra de los instrumentos que permiten llevar un control de las actividades de los estudiantes son los registros del docente, de esta manera se puede contribuir a generar un ambiente de aprendizaje significativo en el estudiante, que luego a través de la utilización de las diferentes herramientas se evidencie las habilidades adquiridas en lo cognitivo, lo afectivo, donde el estudiante asuma el rol principal y pueda tomar decisiones, emprender, relacionar y obtener resultados específicos. Además, en este proceso de enseñanza aprendizaje (personales y no personales) en el momento de la clase y de las actividades extraclase planificadas en la asignatura es importante llevar un registro de las fases que se van perfilando en estos procesos, tal como lo explica (Aguilar, 2018), (Mero, J., Tapia, M., & Ramos, 2018), (Vargas, A., & García, 2017).

En estas fases se cumplen los objetivos más importantes de la educación y que son: integrar el saber, el saber hacer y el saber ser y que esto se puede lograr con la integración de aptitudes, (o conocida como la transposición didáctica) que permitan el desarrollo de los ejes del proceso educativo integral presentes en el proceso de enseñanza-aprendizaje, por ejemplo, de la forma como se enseña control automático aplicado a la minería y en la destilación binaria, que es uno de los temas de investigación de este trabajo.

En todo nivel de educación las TIC (Las tecnologías de Información y Comunicación) han permitido el desarrollo de

ambientes de aprendizaje especializados y que ha sido materia de estudio durante los últimos años, (Duarte, J., Zapata, L., & Rentería. 2010), (Espinoza, 2008).

Esto mismo se puede apreciar en el proceso de enseñanza-aprendizaje de Control Automático en la UNL, con la mediación de las TIC, actualmente.

Con estos entornos virtuales de aprendizaje no sólo cambia el tiempo de la enseñanza tradicional, se puede también introducir el enfoque por competencias que satisface la necesidad de los estudiantes de una educación integral, desarrolladora de las capacidades requeridas por el sistema productivo en este caso en el control automático de la minería y de la industria del petróleo, ya que los entornos virtuales de aprendizajes actuales exigen a los docentes el diseñar y poner en práctica situaciones didácticas que permitan al estudiante adquirir aprendizajes relevantes y útiles para resolver problemas y asumir proyectos en su vida profesional y personal.

Por eso es importante la mediación pedagógica en el desarrollo de la asignatura: La mediación pedagógica, no se refiere a la utilización de tecnologías de primera generación (material impreso, teléfono, casete) o de última generación (Internet, plataformas educativas, teléfonos celulares, agendas electrónicas, etc.) para compartir la información, sino a la intencionalidad y el acompañamiento durante el proceso de aprendizaje y a la interrelación que se teje alrededor del contenido de estudio, con el fin de construir el conocimiento (García, J., Cerdas, V., & Torres. 2018).

Esta necesidad de significar el aprendizaje en el “hacer” ha sido entendido por desarrolladores de equipos educacionales, que preparan material que fácilmente puede ser integrado por el estudiante para elaborar distintos tipos de experiencias, en

diversas disciplinas de su formación (Salinas, 2004), (Espinoza, 2008).

Las posibilidades de equipamiento educacional son variadas, pero su alto costo hace que no sean muchos los equipos que puedan adquirirse con estas características. Una salida es emular procesos y equipos a partir de modelos simulados (Otárola, A., Ostendorff, S., Wuttke, H., & Vogel, 2012), (Quintero, G., Oñate, J., & Arias, 2011). Por lo que emplear laboratorios virtuales es muy beneficioso, normalmente desarrollados para entornos académicos, pero siempre tratando de copiar en lo posible a los ambientes industriales.

Así mismo, se debe tener en cuenta la infraestructura tecnológica, en la cual se evalúa la accesibilidad, navegabilidad y usabilidad de la herramienta virtual utilizada como soporte al proceso educativo, las habilidades en el manejo de las TIC por parte de los profesores y los estudiantes es un aspecto necesario que permite evaluar la efectividad de las TIC en la educación (Cardona, D., & Sánchez, 2010).

1.1.2 Evaluación de los resultados obtenidos en la plataforma

La evaluación del entorno virtual de aprendizaje (EVA) es de vital importancia si lo que se busca es el desarrollo del estudiante, por tal razón debe ser evaluada para que el aprendizaje vaya en la dirección del trinomio enseñanza-calidad-competencias, cada vez más extendida en el ámbito universitario (Restrepo, 2016). Superando de esta manera la reconocida desigualdad estructural del sistema educativo, lo cual predispone el sistema para que ciertos estudiantes alcancen o no el éxito educativo, tal como lo menciona (Gómez, 2015).

Sin descartar lo que afirma el (MEN, 2018), que pone sobre la mesa la conflictividad existente entre las expectativas y los

resultados de quienes demandan educación superior en Colombia y otras regiones y que son: la deserción por período académico o anual se ubica en un 9,0% en formación universitaria, y en un 17,1% en formación de maestrías o doctorados.

Se empieza por analizar la función que tiene la evaluación o para qué se quiere realizarla, ya que consiste en una especie de medición que permite acreditar los estudios alcanzados. Es importante que esa evaluación sea formativa, que permita la retroalimentación y la mejora. Más que recibir una calificación, es fundamental la interpretación sobre los contenidos recibidos por el estudiante y su aplicabilidad. Es útil y necesario lograr también que en un escenario de aprendizaje virtual el estudiante sea capaz de autoevaluarse al identificar sus errores, pueda subsanarlos y a su vez encontrar solución a sus dificultades proponiendo otras alternativas.

También en una evaluación el profesor debe tener en cuenta el grado de independencia del estudiante, su creatividad; recordar que el profesor cuando imparte una materia es un guía del aprendizaje y que quien acomoda el tiempo para su aprendizaje es el estudiante, es él quien autónomamente determina su propio ritmo de aprendizaje.

Las indicaciones permiten clarificar qué y cómo se va a evaluar un trabajo, ponerlo en conocimiento de alumnos y compartir posibles mejoras, por supuesto que para ello es necesario considerar el contexto, el entorno virtual de aprendizaje con que se cuenta; la gestión, lo pedagógico, la producción de contenidos y tecnología en la que se centra la evaluación del curso virtual.

Para realizar la evaluación del entorno virtual de aprendizaje se debe conocer la realidad institucional a la que se enfrenta el equipo de técnicos y pedagogos que se encargarán de la selección de la plataforma y las herramientas informáticas, el

diseño curricular del curso (contenidos, tutoría, evaluación de los aprendizajes, evaluación del curso, etc.), la metodología del aprendizaje electrónico y las condiciones específicas del estudiante.

1.1.3 Desarrollo de prácticas de control automático

El control automático es un área transversal para las disciplinas de ingeniería, ya que siempre se necesita diseñar o hacer uso de sistemas que realicen, de forma autónoma, tareas repetitivas y con la mayor precisión posible, desarrollando estos tipos de sistemas. En consecuencia, los laboratorios de automatización se utilizan no sólo en carreras en las que el control es un área relevante de su especialidad (Ingenierías: Mecatrónica, Mecánica, Electrónica, Química), sino también en otras que lo requieran como un área de conocimiento necesaria para su formación profesional y que deben saber cómo puede ser aplicado, tal es el caso de la Ingeniería Industrial, en Alimentos y la Informática.

Dada la alta demanda de los estudiantes por acceder a estos laboratorios de automatización tradicionales y el alto costo de sus equipamientos, por lo que es casi imposible que puedan estar dotados de la suficiente cantidad de equipos para ser utilizados a la vez y de forma eficiente por un gran número de estudiantes, Es por eso que normalmente sólo los pueden utilizar un conjunto reducido de estudiantes. Por tanto, en los cursos con una matrícula numerosa para una misma actividad práctica se tiene que trabajar con grupos pequeños lo que trae por consecuencia que las mismas experiencias deben repetirse varias veces en la semana para que todos los estudiantes puedan realizarlas, saturándose la jornada académica de prácticas de laboratorios con el empleo de muchas horas dentro del calendario docente.

1.1.4 Aplicaciones de Laboratorios Virtuales y Remotos

Actualmente los laboratorios en línea, online están compuestos de remotos y de virtuales, destacándose tres tipos generales de laboratorio en la educación en ingeniería; a saber, práctico, virtual y remoto; cada uno de ellos con sus propias ventajas e inconvenientes según lo menciona (Hernández, M., Vallejo, A., & Morales, 2019). El uso de estos laboratorios exigen que el estudiante conozca cómo realizar las conexiones de la maqueta a través de una tarjeta de adquisición de datos, por ejemplo, para que en ésta se conecten todos los sensores (Santana, I., Ferre, M., Hernández, L., & Aracil, 2010).

A continuación, se detallan algunos laboratorios y las líneas de investigación que fueron desarrollados en otras universidades.

1. En la Universidad Central Marta Abreu de las Villas (UCLV) en Cuba, se ha sido desarrollado un Sistema de Laboratorios a Distancia (SLD) que se utiliza tanto en la enseñanza como en la investigación en el campo de la Ingeniería de Control. El rendimiento del sistema (SLD) se evalúa por las posibilidades y la funcionalidad de la plataforma de laboratorio remoto propuesto (Santana, I., Ferre, M., Izaguirre, E., Aracil, R., & Hernández, 2013). En el sistema que proponen el control del llenado de una maqueta de tanques interactuantes con la aplicación de un clásico control PID con el objetivo de mantener el nivel en un valor deseado al manipular el cierre y apertura de las electroválvulas, esto se explica más en detalle en (Rubio, E., Santana, I., Rohten, J., Esparza, V., & Martínez, 2018).

La UCLV también ha realizado otras aplicaciones híbridas en control automático, a través de las prácticas de laboratorios remotos en combinación con la docencia presencial en la asignatura de Regulación Automática I, de la Universidad Politécnica de Madrid. En este sentido, la UCVL desarrolló un

sistema de Laboratorio a Distancia (SLD). Cuyo objetivo es el que ambas instituciones puedan combinar adecuadamente las prácticas presenciales y remotas para la docencia de las asignaturas de control automático (Dormido, 2014).

2. LABNET es una plataforma de la universidad europea de Madrid de acceso remoto a un laboratorio de control, que permite realizar experimentos de control sobre tres tipos de sistemas físicos, con tres variantes del controlador PID: el PID teórico, el PID con filtrado de la derivada y el PID con Anti/Windup. Estas tres realizaciones recogen los aspectos más importantes de los PID industriales (Åström, K., & Hägglund, 2009), (Aliane, 2010) .

3. En Oxford (Gran Bretaña), se propone una interfaz (API) que es el patrón de diseño novedoso de programación de aplicaciones, para la intercomunicación entre los sistemas de gestión de laboratorios remotos (RLMSs), que responden a diferentes niveles de soporte funcional y permiten con ello una distribución más eficiente de los recursos de los laboratorios, independientemente de sus RLMSs de alojamiento, es decir, de su ubicación (Lowe, D., Yeung, H., Tawfik, M., Sancristobal, E., Castro, M., & Richter, 2016).

4. Otra experiencia es la que desarrollo la Universidad de la Rioja (UNIR) en España, aplicado aproximadamente a 30 000 estudiantes geográficamente dispersos por diferentes lugares, en el contexto de un modelo educativo para realizar prácticas y evaluaciones puramente en línea (Perales, M., Pedraza, L., & Moreno, 2019).

5.-En (Touhafi, A., Braeken, A., Tahiri, A., & Zbakh, 2017), se describe la arquitectura de un entorno en tiempo real para numerosos experimentos remotos. El entorno se crea con estándares web como HTML5, de modo que el usuario no necesita instalar ningún complemento para el intercambio de mensajes y el uso prácticas remotas con Google Coder.

6. En (Salmerón, E., & Manzano, 2018), se realiza un análisis bibliométrico de toda la producción científica indexada en Scopus en el que determinan cuáles son las principales instituciones y tendencias de investigación en relación con los laboratorios virtuales.

7. Finalmente, en (Estriegana, R., Medina-Merodio, J. A., & Barchino, R. (2019), se aprecia un estudio experimental para examinar la aceptación de la tecnología por los estudiantes y el proceso de adopción de un entorno de aprendizaje en línea que incorpore recursos basados en la web, como laboratorios virtuales y sus implicaciones teóricas y prácticas para el uso educativo. Llegando este entorno de aprendizaje alcanzo el 86% de éxito.

Resumiendo, el acceso a los laboratorios virtuales con una conexión en línea permite simular ambientes de aprendizaje, los cuales se diseñan para ser atractivos y didácticos a quienes los utilizan y además le permiten complementar con los programas tradicionales de aprendizaje formal, que interactúan con la instrumentación industrial, a través de una variedad de experiencias de aprendizaje (Aydogmuz, Z., & Aydogmuz, 2009).

Por tanto, la internacionalización de la enseñanza abre nuevos desafíos como: la creación de redes de investigación, espacios de trabajos compartidos, laboratorios virtuales y remotos, implementación de laboratorios virtuales y teleoperados (Santamaria, F., Ballesteros, J., & González, 2016). *Que vendría hacer lo mismo que se desea implementar en la UNL.*

Otra definición de laboratorios virtuales se la puede obtener en (Hanson, B., Culmer, P., Gallagher, J., Page, K., Road, E., Weightman, A., & Levesley, 2009), (Henke, K., Ostendorff, S., Wuttke, H., & Vogel, 2012), quienes enfatizan que estos laboratorios virtuales sirven para la formación de los estudiantes, priorizando el uso de laboratorios de acceso

remoto para el desarrollo de actividades de aprendizaje, acompañado de los docentes tanto de la institución externa participante del programa.

Dentro de estos laboratorios, se destacan los remotos por la disponibilidad de acceso 24/7, es decir, las 24 horas de cada día de una semana, acercando a los aprendices al manejo de equipos con características industriales, que posibilitan realizar experimentos reales a través de Internet y estar en contacto con el sistema experimental (Santana, I., Hernández, L., Ferre, M., Pinto, E., & Cogollar, 2012).

Costo-beneficio-adquisición, el alto costo de los equipos existentes para estos laboratorios y la diversidad de experimentos que se podrían realizar, hacen que siempre falten equipos para practicar en todos los tópicos de interés y las experiencias que se pueden realizar se hacen pocas veces al año. Por eso, cada vez que se evalúa la compra de un equipo, se tiene en cuenta la relación costo/beneficio, es decir, cuánto cuesta versus cuántas veces se va a utilizar, para definir si un equipo se compra o no.

Además, se debe considerar que los equipos comerciales para la docencia del control están constituidos por componentes diseñados, para trabajar en ambientes de laboratorio y no en condiciones industriales, por lo que rara vez se los encuentran en procesos industriales. Cuando un ingeniero recién titulado se incorpora a la industria, casi siempre se encuentra con unos dispositivos diferentes a los que utilizó en la universidad, lo que le provoca desconcierto sobre su uso.

Para lograr el aprendizaje de temas concretos y que cuentan con el aval de prestigiosas instituciones de educación superior, lo cual se puede verificar con los artículos citados anteriormente, ya que estos muestran aplicaciones reales de este tipo de laboratorios. *La metodología que se desea proponer en este trabajo con este tipo de herramienta se basa*

fundamentalmente en los principios integradores que rigen los modelos (socio-constructivista y conectivista).

1.2 Estado actual de la automatización en los procesos de trituración en minas de cobre y su adaptación para la enseñanza en los laboratorios virtuales

La mayor parte de la extracción de cobre en Ecuador es a cielo abierto, la cual se caracteriza por que el cobre fluye a la superficie y la profundidad depende del desarrollo de la explotación. En esta primera etapa se remueve el mineral desde el yacimiento, con la ayuda de explosivos, luego entran en operación las palas mecánicas o eléctricas, para remover y transportar el material para su procesamiento. Procedimiento que es propio de la minería moderna y que se caracteriza porque es un proceso técnico para obtener selectivamente metales, que implica grandes inversiones y muchos años de trabajo e investigación. Las condiciones para que un proyecto minero de este tipo llegue a establecerse son muy variables y complejas, basta decir que, entre 1 000 proyectos, solo 1 llega a establecerse (ECSA, 2010).

1.2.1 Trituración

Para lograr triturar cierto material se parte de una cantidad promedio en alrededor de 30 000 toneladas diarias en una trituradora del tipo que se elija. Las mismas son depositadas sobre ésta y las rocas son fracturadas hasta los 80 milímetros de diámetro. Por su parte (Wills, B., & Napier, 2008), considera que la conminución o reducción de tamaño de la piedra, se da de aproximadamente de 1,5 metros a 300 micrones.

Seguidamente, y continuando en la línea de producción aparecen las bandas transportadoras que conducen el material hasta el molino semiautógeno SAG, que es un molino giratorio tipo tambor, que entrega un material a su salida reducido a un

máximo de 27 milímetros. En la etapa que sigue, la trituración continúa y las partículas no superan los 0,15 milímetros, el equivalente a una arena fina. Después, se pasa a las celdas de flotación que es un proceso físico, que usa agua, aire y colectores no contaminantes (ECSA, 2010).

1.2.2 Almacenamiento y transporte al puerto

El concentrado de cobre contiene un 30 % de cobre puro, un 9 % de humedad y se almacena en depósitos cubiertos. El transporte al puerto se realiza con la ayuda de camiones y una capacidad normal de transportación diaria de 600 toneladas de concentrado. El proceso de carga de los buques es seguro, operando a través de bandas transportadoras y brazos cargadores.

El material sobrante de la voladura, molienda y flotación va a las escombreras y piscinas de relevantes. Área técnicamente preparada para una rápida revegetación y rehabilitación al final del proceso. (ECSA, 2010).

Como se mencionó anteriormente después de la extracción de los minerales de la tierra, éstos deben ser preparados para el mejor uso o mejor procesamiento. El primer paso es la reducción gradual del material duro hasta convertirlo en polvo fino, con la ayuda de un circuito de trituración que exige mucha energía para su correcto funcionamiento. La estimación porcentual de energía consumida en las etapas de tratamiento y beneficio para obtención de Cu (ECSA, 2012), son como se muestran en la Figura 1.1.

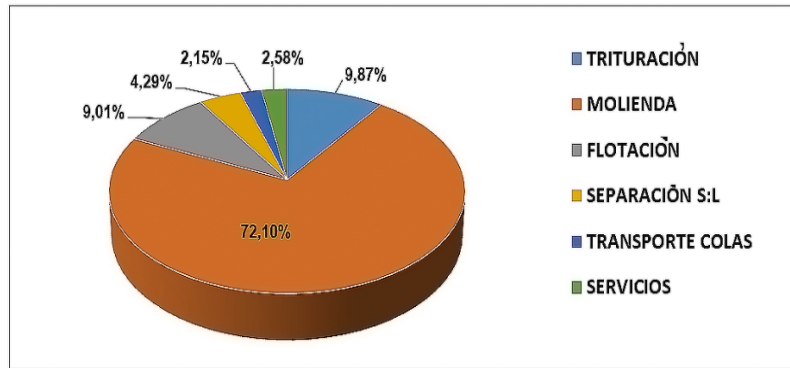


Figura 1.1 Informe del Proyecto Estratégico Minero “Mirador”. Fuente:(ECSA, 2012).

Por las razones antes expuestas el objetivo del sistema de automatización que se utiliza en la minería, tiene por contexto el de aumentar la eficiencia y la productividad, así como ayudar a apoyar a la operación con información.

1.2.3 Tipos de trituradoras primarias

Algunos de los componentes de una trituradora de cono típico y todo su equipamiento asociado, es decir, de alimentación, cintas transportadoras y pantallas, se pueden encontrar en algunos de los concentradores chilenos y se representa a continuación en la Figura 1.2, donde se ve el esquema de una trituradora con los diferentes factores que afectan al proceso de reducción de tamaño, de un material de flujo a través de la tolva de trituración (Whiten, 1972), (Hatch, C., & Mular, 1982).

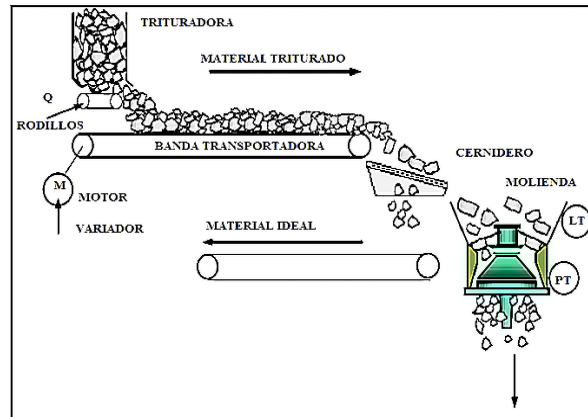


Figura 1. 2 Una trituradora con y sus componentes asociados, Fuente:(Hatch, C., & Mular, 1982).

En las trituradoras primarias se aplican fuerzas de rotura por medio de compresión o impacto, las del tipo de mandíbula giratorias son las trituradoras primarias por compresión más comunes. En éstas la fuerza se aplica lentamente (en comparación con las máquinas de impacto), resultando en la abrasión y la escisión de la fractura.

En las trituradoras de impacto se aplica una fuerza de impacto de alta velocidad, sobre las partículas de roca utilizando martillos o barras de golpe. La velocidad de entrada de la energía es mucho mayor y esto causa que las partículas se rompan. Las trituradoras de impacto pueden alcanzar relaciones de reducción más altas que las de mandíbulas giratorios, pero éstas están limitadas por los altos índices de desgaste por abrasión y por lo tanto se limitan a las rocas más suaves (Li, Z., Ren, H., & Gan, 2015), (Staples, P., Lane, G., Braun, R., Foggiatto, B., & Bueno, 2015).

Las trituradoras de mandíbulas han existido por casi 175 años, estas se distinguen por la presencia de dos placas, una de las cuales es fija y otra que se abre y luego se cierra entre las dos superficies. Hay tres tipos de trituradoras de mandíbulas:

Blake, Dodge, y Universal, se clasifican de acuerdo a la ubicación del punto de pivote de la mandíbula oscilante. El tipo más común de la trituradora de mandíbulas hoy es el de Blake, patentada por Eli Whitney Blake en 1858 (Weiss, 1985).

Para la selección de la trituradora tipo mandíbula debe tomarse en cuenta los siguientes aspectos (Li, Z., Ren, H., & Gan, 2015), (Weiss, 1985):

- El carácter petrográfico de la roca
- El índice de la abrasión del agregado
- La resistencia mecánica de la roca
- El índice de trabajo, o quebrantamiento de la roca
- La fragilidad de la roca
- La descamación de la roca
- El tamaño de alimentación
- El tamaño del producto deseado (o relación de reducción)
- El rendimiento a triturar (toneladas por hora)
- Los costos de operación a largo plazo.

Las trituradoras de mandíbulas son máquinas grandes, y resistentes, capaces de aplastar grandes cantidades de materiales duros y abrasivos. Se emplean típicamente como trituradoras primarias dentro de las plantas de procesamiento de agregados. Estas trituradoras son comúnmente más deseadas por su tamaño y boca abierta.

Las placas de una trituradora de este tipo se utilizan para aplicar fuerzas de compresión, que inducen tensiones de tracción dentro de las partículas, causando su fractura. Las partículas se muerden varias veces hasta que pasan a través de la cámara de trituración. El proceso de rotura se produce entre las placas de las mandíbulas y actúa simultáneamente con un proceso de clasificación. El proceso de clasificación define si o no, una partícula se somete a trituración y depende de los ajustes del tamaño de la trituradora y de las partículas (Donovan, 2003), (Lane, G., Foggiatto, B., & Bueno, 2013), (Foggiatto, 2017).

Para la selección y diseño de una trituradora tipo mandíbula se debe tomar en cuenta: la predicción de la potencia a la que va a trabajar, el modelo teniendo en cuenta la dureza y facilidad de trituración del material, es decir, la capacidad o el rendimiento de este tipo de trituradoras se define más adecuadamente mediante el tamaño del producto, la energía que consume según el tamaño de la trituradora y por mantener las tasas de producción de destino (Donovan, 2003), (Jani, K., Jari, H., Martti, L., Heikki, H., & Miettunen, 2005).

1.3 Automatización del proceso de trituración

Para lograr esto se hace uso de laboratorios virtuales que ya han sido desarrollados y a continuación se hace una descripción de los mismos.

1.3.1 Posibilidades que brinda el uso de laboratorios virtuales

Para el aprendizaje de las disciplinas relacionadas con la ingeniería y en concreto, para el aprendizaje de la teoría de la automatización y de la ingeniería de sistemas, resulta sumamente importante poder experimentar en el laboratorio sobre los conceptos desarrollados a nivel teórico en las clases de aula. Esta necesidad se percibe de la misma forma por parte de las industrias.(Weinberg, 2003), (Jung, 2013).

Por tal motivo el alumno debe poner en práctica el trabajo planteado de manera teórica en el aula. El principal problema a la hora de realizar los experimentos reside en el precio de los equipos. Una solución la plantean (Márquez, J., & Sanguino, 2010), al proponer salvar este inconveniente mediante el uso de procesos simulados (laboratorios virtuales).

En este último caso, la multiplicidad de uso se consigue, o bien, habilitando franjas temporales para cada uno de los alumnos, o bien, mediante la compartición de equipos entre distintos departamentos o universidades (Guo, J., Kettler, D., & Al-Dahhan, 2007), (Henry, J., & Schaedel, H, 2005), (Ionescu, C. M., Fabregas, E., Cristescu, S., Dormido, S., & De Keyser, 2013), (Chaos, D., Chacon, J. J., Lopez-Orozco, J. A., & Dormido, 2013).

Otra solución en la implementación de laboratorios más económicos está en el uso de tarjetas de adquisición de datos como: National Instruments, Arduino entre otras, permiten el desarrollo de laboratorios completos con un mayor número de equipos por estudiante, donde es posible que los alumnos pongan en práctica, los conocimientos adquiridos en el aula (Zachariadou, K., Yiasemides, K., & Trougkakos, 2012), (Saleiro, M., Carmo, B., Rodrigues, J., & Du Buf, 2013).

La introducción a la programación, el aprendizaje de la automatización, el control por computador, la robótica y los sistemas mecatrónicos, en general, son contenidos que se están impartiendo cada vez más a estudiantes universitarios y de educación secundaria. Por esta razón, la elección de plataformas adecuadas para el trabajo en el laboratorio se convierte en una decisión crítica, para promover la experimentación de los conceptos teóricos y la motivación de los estudiantes.

Gracias a los avances en la tecnología, hoy en día hay muchas opciones disponibles, tanto a nivel de hardware como a nivel

de lenguajes de programación (Valera, A., Soriano, A., & Vallés, 2014).

Considerando los criterios anteriores en esta tesis se pretende implementar una plataforma de bajo costo multidisciplinario, que permitirá cubrir diferentes cuestiones relacionadas con la realización de trabajos prácticos enlazados con el control automático. Empleando un prototipo de trituración que será desarrollado por estudiantes y docentes de la Universidad Nacional de Loja.

1.3.2 Identificación de modelos de procesos mineros

Dentro de los procedimientos para obtener un modelo matemático que represente a un proceso determinado están: el analítico, con datos de entrada-salida y la otra variante es usar Simscape, que es un lenguaje basado en MATLAB® orientado a objetos, simulando sistemas físicos dentro del Simulink, que han sido previamente dibujados, por ejemplo, en SolidWorks.

Si la variante es obtener un modelo haciendo uso de datos de entrada y salida de un proceso determinado, como la práctica que se implementara de trituración de cobre en este trabajo, entonces la siguiente etapa es validar o verificar el modelo obtenido.

Para esto no solamente deben ser tomados datos para la estimación y validación del modelo, en una sola corrida, sino en diferentes pruebas y con diferentes perturbaciones (algo que se da con mucha frecuencia y que afecta a la salida).

Para validar se debe tener en cuenta, que algunos requisitos son inalcanzables y si se quiere realizar la verificación hay que hacerla con algunos estándares de diseño, Así, por ejemplo, (Numbi, B., Zhang, J., & Xia, 2014), desarrolla dos modelos de control óptimos para la gestión energética de un proceso de trituración minera basado en trituradoras de mandíbula. Dichos modelos hallados reafirman el buen funcionamiento

del prototipo bajo ciertas condiciones drásticas de diseño (Dorf, R., & Bishop, R, 2008) también se puede revisar (Ogata, 2010).

1.3.3 Laboratorios virtuales, usando algoritmos de control

El controlador PID, está presente en los dos procesos del MacroLaboratorio de la UNL, este es el algoritmo de control más común hoy en día. En control de procesos, más del 95% de los lazos de control son del tipo PID, aunque de ellos la mayoría son, realmente control PI (O'Dwyer, 2012). También existen herramientas de software como (MATLAB®, 2014), que son muy útiles a la hora de calcular los parámetros (Proporcional-Integral-Derivativo), los cuales como dice (Blevins, T., & Nixon, 2010), (Åström, K., & Hägglund, 2009) ayudan a mejorar el rendimiento de la planta.

De manera general, en un sistema de control los requisitos son diversos, pero los factores claves son:

- a) Presentar buen desempeño ante las perturbaciones de carga y el ruido de medida, propio de los sensores.
- b) Condiciones de robustez ante cambios de proceso.
- c) Una respuesta lo más ajustada posible al punto de consigna.

A veces el compromiso de cumplir con todas estas exigencias para un sistema con solo realimentación del error y con un control PID resulta muy difícil (Moliner, R., & Tanda, 2016). Además, entre los criterios clásicos de ajuste de estos controladores se pueden citar los siguientes: Método de Tanteo, Método de Ziegler & Nichols y el Método de la curva de reacción de Ziegler & Nichols (Creus, 2007). También el criterio de Cohen-Coon (Gaviño, 2010).

El control PID que se empleará en esta tesis, para las comparaciones con otras estrategias de control aplicadas a los

procesos de trituración y de destilación binaria, podría aplicar el criterio de estimación en línea, o de autoajuste con la ayuda de MATLAB®, porque permitirá auto ajustar la salida del proceso con datos de entrada, que son medidos a través de sensores. En la actualidad son muy usados los controladores digitales, éstos a menudo se utilizan para resolver los problemas relacionados con la operación global óptima de plantas industriales (Kuo, 2012). Existen algunos tipos de controladores, en los cuales las acciones de control están una a continuación de la otra como lo que plantea (Ruíz, V., & Alfaro, 2012).

Todos estos controladores son una variante de la ecuación de control (1), cuya diferencia primordial varia en que requieren menos amplificadores que uno en paralelo, reduciendo así su costo. Este mismo autor también indica que la mayoría de los controladores neumáticos y electrónicos analógicos fabricados, son del tipo serie, mientras que en los actuales controladores electrónicos digitales, es usualmente posible seleccionar el tipo de ecuación del PID deseado, aunque no todos los fabricantes brindan información completa de cómo están construidos internamente sus controladores (Alfaro, V., Arrieta, O., & Vilanova, 2009).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Otra técnica que se emplea, para utilizar el que mejor desempeño brinda al prototipo de trituración de cobre, es el control MPC. (Control Predictivo basado en modelo). En este tipo de controlador, la predicción de la salida de un proceso está basada en el perfil de los valores de entrada y salida en el tiempo pasado. El objetivo del MPC, es determinar la secuencia de movimiento del control, que son los cambios en la entrada manipulada (u), así como también en la salida actual (y) y la salida predictiva futura (\hat{y}), los cuales se muestran en la Figura

1.3.

El instante actual muestreado es denotado por (k) , estrategia calculada por el MPC, a partir de un conjunto de valores M de la entrada $[u(k+i-1), i=1, 2, M]$, esto es, el conjunto de valores consiste de una entrada actual $u(k)$ y entradas futuras $k+M-1$. La entrada se mantiene después del control de entradas futuras designadas por M , independientemente que éstas se muevan.

Las entradas se calculan de manera que un conjunto de valores de P predice la **salida** $[u \text{ con } \hat{y}(k+i-1), i=1, 2, P]$ y alcanzan el punto de ajuste de manera óptima, los cálculos del control se basan en la optimización de la función objetivo. Por tal razón, el número de predicciones es referido como horizonte de predicción, mientras que el número de movimientos de los controles es llamado horizonte de control (Seborg, D., Edgar, T., & Duncan, 2004).

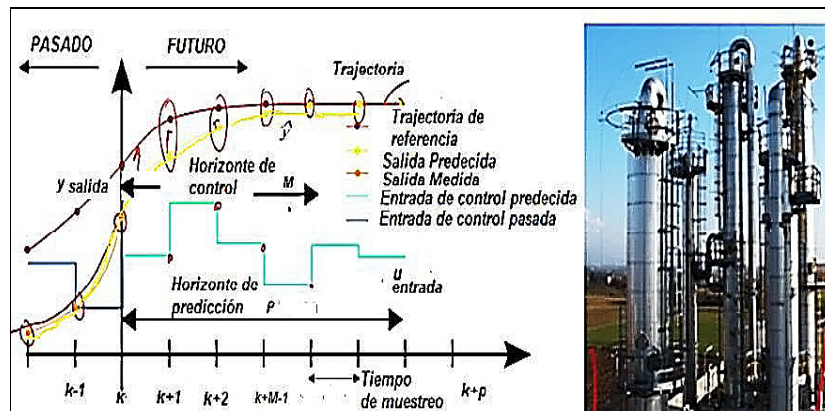


Figura 1. 3 Conceptos básicos del control predictivo, donde se muestra una torre de destilación a la que se pretende aplicar este tipo de técnica, Fuente:(Seborg, D., Edgar, T., & Duncan, 2004).

Simplemente, la sumatoria de ambas partes es la respuesta forzada y libre, que permite encontrar la respuesta predictiva del sistema. Lo anterior se puede presentar a través de una representación matricial o vectorial, para facilitar los cálculos

y poder entender un poco mejor el proceso y así poder implementarlo en MATLAB®, el cual es bien usado en las industrias de petróleo y gas.

Luego de revisar algunos de los algoritmos de control usados en la industria, como son las técnicas de: Control Clásico e inteligente, se puede concluir de no haber sido empleados con anterioridad en el MacroLaboratorio de Formación Conjunta (MFC).

1.3.4 Automatización de las bandas transportadoras en la minería

Para el caso cuando el retraso es muy grande por la presencia en el prototipo de bandas transportadoras y que el regulador no funciona, entonces se emplea el predictor de Smith, el cual elimina este problema y es muy utilizado para procesos con retrasos dominantes, como será mostrado en una de las prácticas que se presenta en esta tesis.

Como es conocido uno de los factores que más afecta la calidad y estabilidad de un sistema de control, ya sea este basado en PID u otro cualquiera, es la presencia de ‘‘retardo puro o retardo por transporte’’ en el canal de control. Muchas soluciones han sido intentadas para compensar el efecto negativo del retardo, destacándose entre otros por su sencillez y efectividad el llamado ‘‘Predictor de Smith’’, que, en su forma original, supone la modelación del proceso a controlar mediante una función de transferencia de primer orden con retardo, como la de la ecuación (2).

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{T_s s + 1} \quad (2)$$

En la Figura 1.4, K_p , θ_p y T_p representan la ganancia, el retardo y constante de tiempo del proceso y K_m , θ_m y T_m los parámetros

correspondientes del modelo, nótese que por conveniencia se han representado en bloques separados el retardo $e^{-\theta_p s}$ y el retardo del modelo $e^{-\theta_m s}$ (Aguado, 2010).

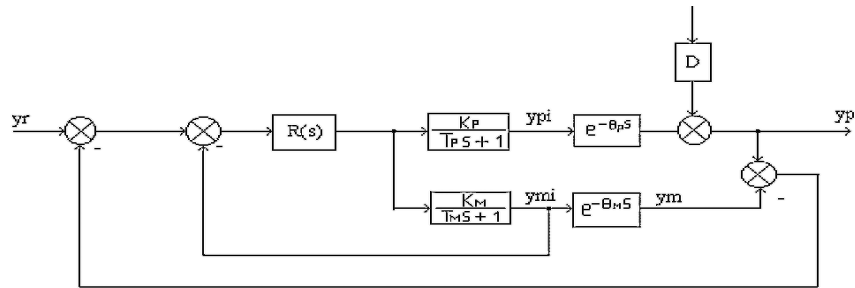


Figura 1.4 Lazo de control con Predictor de Smith, Fuente:(Aguado, 2010).

El prototipo que se desarrollara en la UNL es para transportar el material a cielo abierto a través de bandas transportadoras, a diferencia de lo que sucede en las operaciones de minería subterránea donde para el transporte de mineral, se emplean los vehículos volcado de carga, load-haul-dump (LHD) principalmente en los túneles donde el acceso es difícil o peligroso. Por lo tanto, es necesario una sólida estrategia de control de realimentación, tal como lo indican (Núñez, F., Navarro, S., Aguado, A., & Cipriano, 2008), quienes proponen un esquema basado en la estimación del estado del MPC y que fue diseñado para fines de control por los autores de este artículo, su evaluación se hace por simulación.

En el trabajo que presentan estos autores, el estimador de estado fue desarrollado con la prueba de cuatro enfoques diferentes, con el fin de seleccionar el óptimo y que fueron los siguientes: el filtro de Kalman extendido, filtro de partículas, filtro en movimiento y Horizonte Estimador, a diferencia del que se presenta en esta tesis que empleara los dos últimos con la ayuda del software de MATLAB®.

1.3.5 Retos y logros que se deben conseguir al simular y controlar a distancia en el laboratorio virtual

Para analizar el tema de la simulación y control de prototipos a distancia se analizan algunos trabajos que se han hecho con anterioridad, uno de ellos es el de (Sbarbaro, 2005), quien dice que las trituradoras juegan un papel importante en la trituración de minerales y el control de su funcionamiento puede conducir a un aumento del rendimiento y la eficiencia de la planta. En este trabajo se pretende lograr lo anterior, pero a escala de laboratorio, partiendo de la construcción de un prototipo y luego elaborar un modelo matemático del proceso para poder aplicarle técnicas de control.

Al realizar cualquier prototipo se debe considerar la creciente complejidad de los procesos industriales, lo que hace en ocasiones muy difícil la elaboración de modelos dinámicos fenomenológicos o de primeros principios, adecuados para realizar predicción, optimización y control. Entre otras tareas importantes, un enfoque alternativo y fructífero para abordar este problema, consiste en el diseño de modelos basados en datos (Acuña, 2014). Estos datos se pueden obtener a través de un proceso real o un prototipo a escala de laboratorio, como en la presente disertación.

En la actualidad, se han aplicado diferentes técnicas de control a diversos prototipos educacionales, la importancia de estos prototipos radica en el bajo costo que tienen con relación a sistemas reales (Moriano, P., & Freddy, 2012).

El costo es más bajo al trabajar con prototipos, en lugar de un proceso real, por las ventajas que permite el simular diferentes ambientes de trabajo. Esto es posible en gran parte porque a través de sensores instalados a una DAQ (dispositivo para adquisición de datos), se puede monitorear el comportamiento del proceso y de esta forma obtener datos que permitan hallar

un modelo matemático de la dinámica del mismo.

En el mundo académico, en la evolución hacia modelos no lineales se puede observar que los modelos lineales y no lineales pueden ser construidos con el conocimiento mecanicista (modelos de caja blanca) o los datos de entrada-salida disponibles (modelos de caja negra). En general, este último método se puede emplear de forma flexible y sin un gran esfuerzo. Los modelos lineales a menudo se prefieren en la práctica industrial, donde las técnicas de identificación de sistemas de caja negra se conocen bien y se describen en (Ljung, 1999).

1.4 Sistemas de control aplicados a circuitos de Molienda

Automatizar el circuito de molienda, conduce a la automatización/robotización de subprocesos en el área de producción, en el punto de descarga, mejorando la seguridad de los trabajadores, tal como lo plantea (Pawel, S., Jacek, W., Jakubiak, J., & Zimroz, 2017). En cuanto al proceso de molienda se han presentado algunas contribuciones en el campo del control automático en los últimos años y que se indican a continuación:

Los controladores PID convencionales, incrementan el esfuerzo en el diseño de los controles que tienen como objetivo desacoplar interacciones y proporcionar un buen rechazo de perturbaciones de carga. Pero siempre considerando los sensores y actuadores que desempeñan un papel importante en cualquier proceso de control y, por lo tanto, también se contemplan en el presente documento.

Otra variante de controlador lo presenta (Airikka, 2013), quien introduce un nuevo tipo de controlador PID, como el Predictor de Smith, y justifica su uso para la regulación del tiempo muerto dominante en la integración de procesos de trituración.

Los algoritmos de control anteriores: PID, MPC, LQR y el controlador basado en Predictor de Smith, serán empleados en este trabajo, destacándose que permitirá mejorar el parámetro o índice para minimizar el cuadrado del error, Minimize the square of the error (MSE), cuando se use por ejemplo el algoritmo de Control Predictivo basado en modelo, Predictive Control Method (MPC) al prototipo de trituración.

Control multivariantes. Los circuitos de molienda son procesos que presentan dinámicas no lineales bajo un amplio intervalo de operación (Liu, Y., & Spencer, 2004), para aprovechar toda su potencialidad, su control debe llevarse a cabo mediante estrategias de control multivariantes. De hecho, la necesidad de controlar simultáneamente varias variables con un alto grado de interacción, justifica el empleo de cualquiera de las estrategias de control multivariantes (Ospina, 2009).

Existen otras publicaciones importantes que afirman que los procesos de trituración y cribado son a menudo regulados mediante la retransmisión del encendido y apagado de los controles, cuando son controlados por controladores PID, tal como, es el caso del diseño de control de esta tesis, que no solo se limita a uno solo la trituradora, sino de algún elemento que est próximo, es decir, las bandas transportadoras, destacando que el diseño no tiene en cuenta necesariamente las interacciones de procesos, como las perturbaciones y en un amplio punto de vista, no trata a una planta de trituración y cribado como una entidad de la alimentación en una línea de producción, si no como elemento aislado.

El control automático del alimentador primario también es controlado con un nuevo enfoque como el planteado por (Airikka, 2015), el cual controla el avance de las bandas transportadoras para permitir una producción agregada no interrumpible y más productiva.

Otra alternativa de control es el uso de modelos ARMA, para triturar el material de mina, cuando se emplean los molinos semiautógenos, estos son difíciles de controlar principalmente por su alta no linealidad.

Estos métodos para estimar los cambios en la dureza del material de mina usan modelos dinámicos y la obtención de datos simulados y luego con datos reales, finalmente compara los resultados. Para esto hace uso de técnicas de estimación de estados como son: filtros de Kalman, filtros de partículas y estimadores de horizontes móviles, destacando que la que mejor resultado entrega en la mayoría de los casos son los filtros de Kalman, pero se obtienen modelos con altos grados de estimación que se pueden reducir usando Modelos de Media Móvil Autorregresiva, AutoRegressive Moving Average models (ARMA), (Cuevas, A., & Cipriano, 2008).

Otra aplicación es emplear un modelo de circuito de la molienda utilizando para esto una aproximación lineal invariante en el tiempo de un modelo de circuito fundamental, este modelo de detección de la planta de desajuste o circuito de molienda está bajo control MPC. Muchos experimentos realizados en las industrias muestran que al introducir el modelo su ubicación se ve reflejada en la matriz multivariable, esto se puede apreciar cuando el modelo es llevado al lenguaje del MATLAB®/Simulink, con el objetivo de lograr detectar correctamente la influencia en la aplicación de esta estrategia. Destacándose que, para que la estrategia de MPC. funcione adecuadamente, se requiere una señal suficientemente alta de salida, si esto no es así, se producen durante el funcionamiento normal de la planta, cambios de consigna en las salidas relevantes, las que pueden ser evitadas si se introduce una señal de un elevado nivel (Olivier, L., & Craig, 2011).

1.4.1 Control del proceso de trituración, usando sistemas inteligentes

En la actualidad existen procesos en la minería que son controlados a través de sistemas inteligentes, algunos de ellos se presentan a continuación:

Estimación de estados, este procedimiento es usado en procesos complejos como el de molienda semiautógena (SAG) en la minería del cobre y que consiste en una metodología simple y original para desarrollar modelos como por ejemplo el basado en Promedio móvil autorregulador no lineal, Moving Average Non-Linear Self Regulator (NARMAX) confeccionados con Máquinas de Soporte Vectorial, Support Vector Machine (SVM) y que se puede aplicar para tareas difíciles, debido a las dificultades para medir directamente ciertas variables relevantes en línea y en tiempo real.

Otra propuesta es la de (Acuña, 2014) quien plantea una comparación entre los modelos dinámicos Autoregresivo Exógeno no lineal, Dynamic Models Nol-linear Exogenous Autoregressive (NARX) y NARMAX, respectivamente, construidos con el uso de Redes Neuronales Artificiales, Artificial Neural Network (RNA) y SVM, Modelos de promedio móvil automático regresivo, Automatic Moving Average Model (ARMA), cuando actúan como estimadores de una de las variables de estado más importantes para la operación de molienda SAG. Para lograr esta comparación el autor indica los resultados de la potencia predictiva de los modelos NARMAX, que incorporan los errores de predicción en tiempos anteriores para predecir la evolución futura del proceso y la ventaja de aquellos elaborados mediante SVM por sobre los confeccionados con RNA.

El modelo NARMAX-SVM que se presenta minimiza el cuadrado del MSE significativamente inferior al de todos los otros modelos, es decir, en términos del proceso de molienda, se proporciona una herramienta útil para la estimación en

línea y en tiempo real de una variable que permite controlar y optimizar el proceso y que no puede ser medida mediante instrumentos fácilmente disponibles.

Así también, se puede indicar el tipo de controlador que usa (Abuhasel, 2019), para optimizar el consumo de energía en la etapa de trituración por una trituradora de mandíbula, el cual es el tipo más utilizado, empleando ayuda del Sistemas Adaptativos de Inferencia Neuro-Difusa, Adaptative Network-based Fuzzy Inference Systems (ANFIS).

1.5 Estado actual de la automatización en procesos de destilación de mezclas binarias y su adaptación para la enseñanza en laboratorios virtuales

La destilación es una técnica común para la separación de corrientes líquidas con dos o más componentes y es una de las operaciones unitarias más importantes en la industria química (Luyben, 2014). El diseño y control de una columna de destilación es de gran importancia, ya que permite obtener corrientes de producto con la pureza requerida, ya sea para la venta o para su utilización en otros procesos químicos (Bequette, 1988).

En la mayoría de las industrias las columnas de destilación presentan esquemas de control lineal y generalmente corresponden a controles tipo cascada (Paramasivan, G., & Kienle, 2011), los cuales deben ser planteados por la dinámica no lineal presentada por este tipo de sistemas (Alzate, 2010).

Debido a la complejidad que presentan las columnas de destilación que se encuentran en las plantas industriales, la demanda de un producto con calidad y de bajo costo no puede satisfacerse si no se aplican las herramientas modernas de control, en su concepción teórica y las nuevas tecnologías basadas en las mismas, implica toda una serie de ventajas tales como:

- Aumento de la eficiencia.
- Mayor confiabilidad de una unidad de destilación y calidad del producto,
- Optimización del proceso a su máxima capacidad.

Lo mencionado anteriormente exige promover la investigación de este campo en países y universidades, para lograr tener una tecnología de vanguardia (Rodríguez, M., Hernández, C., & Evangelista Neto, 2015).

La operación de separación se obtiene por coexistir dos zonas de diferentes temperaturas, presión, composición y fase de estado. Cada molécula de la mezcla al separarse reacciona de una sola forma a los diferentes ambientes ofrecidos por las zonas, consecuentemente como el sistema se mueve hacia el equilibrio, cada componente de la mezcla se establecerá en cada zona a diferente concentración, permitiendo este resultado realizar la separación de las mezclas.

El alimento o la mezcla a destilar es introducido en uno o más puntos de la torre de destilación, para así aprovechando la diferencia de gravedad entre vapor y líquido, se pueda observar que el vapor asciende por la columna, encontrándose en cada plato de la torre con el líquido que tiende a descender por la torre.

Los calentadores pueden vaporizar parcial o completamente el flujo que reciben del fondo de la torre, el resto del líquido se retira de la torre como sedimento y el vapor que llega a la parte superior de la torre se enfría y se vuelve líquido en el condensador.

Este líquido retorna a la columna como reflujo pudiéndose utilizar para esto una válvula de descarga, que permita mantener el control de uno de los componentes de la mezcla, además de poseer presión, produce en la torre un desbordamiento del líquido por la torre que se riega por cada

plato. El resto de la mezcla que cumple con la composición deseada es retirado como destilado o producto final en la parte superior de la columna.

En algunos casos solo una parte del vapor se condensa de manera que el destilado de vapor puede ser retirado (Perry, 2018). A continuación, se indica algunos conceptos y las partes más importantes de una columna de destilación.

1.5.1 Columna de destilación binaria

A diferencia de lo que sucede con el refinamiento de petróleo, en la que se obtienen varios derivados luego del refinamiento, el objetivo de una columna de destilación binaria, es el de separar una mezcla líquida de dos sustancias, con distintos grados de volatilidad, obteniéndose como producto dos flujos a los que se les llamará destilado (D) y sedimento (B, por la denominación en inglés de fondo que es bottom).

1.5.2 Concentración de una mezcla binaria

Es la fracción molar o másica del componente más volátil, es decir, en qué porcentaje está presente en la mezcla el elemento más volátil. El destilado es el que tiene una concentración muy alta cercana a 1, por lo que es casi el elemento más puro volátil. El sedimento tiene una concentración cercana a cero, y es casi el elemento menos puro volátil.

Como ejemplo, se puede mostrar la mezcla de separación de alcohol con agua, en donde se deja caer la mezcla de plato en plato, para que se evapore paulatinamente, mientras el vapor sube y sale por la parte superior. Dado que la evaporación del líquido depende del área de contacto y de la evaporación en cada plato, se busca maximizar esta área de contacto.

Así mismo, en las columnas de destilación binaria según (White , 2012), se debe observar velocidad de alimentación y presión fijas, las dos variables principales que pueden

manipularse para regular la columna son el trabajo del calderín (E), que puede ser controlado por un controlador de temperatura, y la velocidad de reflujo (R), dependiendo de la tasa de alimentación y la composición, las ecuaciones de estado estacionario que rigen la destilación binaria simple son el *balance general de materiales*, esto se ve en la ecuación (3), la cual representa un sistema con entradas, salidas y reacciones químicas. Y *balance material del componente*, que se puede apreciar en la ecuación (4), respectivamente.

$$\text{Acumulación} = \text{Entradas} - \text{Salida} + \text{Generación} \quad (3)$$

$$r_e - r_s + r_{sn} = r_{na} \quad (4)$$

Donde:

r_e = rapidez de entrada de materia del sistema; r_s = rapidez de salida de materia del sistema; r_{ns} = rapidez neta de reacción de la materia en el sistema; r_{na} = rapidez neta de acumulación de materia en el sistema.

Así también, en las columnas de destilación binaria se debe analizar la condición térmica óptima de la alimentación, ya que esta contribuye significativamente a aumentar la eficiencia termodinámica de un proceso de destilación, tal como lo menciona (Bandyopadhyay, S., Ranjan, K., & Shenoy, 2003).

Por su parte (Liu, X., Zhang, B., & Chen, 2016), aplica el método de la gran curva compuesta de la columna (CGCC) para optimizar simultáneamente la ubicación y las condiciones de alimentación de una columna de destilación para reducir los costos totales de la utilidad. El método CGCC basado en la condición termodinámica casi mínima y que es conocida como (PNMTC) se puede descomponer en dos curvas teóricas para las curvas generales de rectificación y separación general.

1.5.3 Sistemas de control aplicados en Instalaciones de Petróleo

Se propone en (Liu, D., Yuan, Y., Chen, H., Qian, X., Zhang, L., & Huang, 2018) el control de una columna de destilación binaria, en espacio de estados, utilizando para ello un control dinámico de la columna de destilación binaria se propone en términos de los promediados absolutos magnitudes de variación de índice (AAVM). La viabilidad y efectividad del método propuesto se evalúa sistemáticamente. Los resultados obtenidos demuestran que el método propuesto puede realizar con eficacia el equilibrio entre el diseño de estado estable y el control dinámico de la columna de destilación binaria y reducir drásticamente la complejidad e intensidad en los cálculos de búsqueda también.

Otra iniciativa para el control de los parámetros más significativos de las CDB (Columnas de Destilación Binaria), se la puede apreciar en el artículo de (Bhat, V., Thirunavukkarasu, I., George, V., & Sreelatha, 2019), aquí se trata sobre el diseño del controlador de Derivado Integral Proporcional (PID) en la estrategia de control centralizado y descentralizado. El controlador descentralizado está diseñado con un controlador adicional llamado desacoplador. Estos procesos tal como lo dice (Hamdy, M., Ramadan, A., & Abozalam, 2018). deben ser analizados por sistemas de control por desacoplamiento para una columna de destilación binaria de dos entradas y dos salidas (MIMO) a través del controlador proporcional-integral (PI).

La idea clave detrás de este artículo es diseñar dos nuevos esquemas de desacoplamiento difuso que dependen del conocimiento humano, en lugar del modelo matemático del sistema utilizado en los esquemas de desacoplamiento convencionales.

También (Abraham, A., Pappa, N., Shanmugha Priya, M., & Hexy, 2017) sugiere desarrollar un control predictivo

generalizado (GPC) óptimo para la columna de destilación binaria utilizando el primer modelo principal y los modelos linealizados, sin disminuir su rendimiento al obtenerse modelos linealizados de 16 y 5 orden, respectivamente, reducidos.

Por su parte en (Rodríguez, M., Hernández, C., & Evangelista, 2015) se muestra el control de una columna de destilación binaria de una planta de producción de etanol, teniendo como datos experimentales los tomados de la literatura y verificados con los observados en una columna de la planta cubana “Melanio Hernández”, de la provincia de Sancti-Spiritus. Los sistemas desarrollados se simulan digitalmente mediante MATLAB® y se verifica su desempeño

En el trabajo de investigación que se presenta en esta tesis, se pretende realizar el control de algunos de los parámetros más importantes de una columna binaria de destilación empleando un **laboratorio en línea**, se sugiere abordar el tema del control por desacoplo y su aplicación. De forma parecida a lo que lo hace a la metodología para hallar los aspectos básicos del control por desacoplo y su aplicación a dos procesos representativos: una planta experimental de cuatro tanques acoplados y un modelo 4×4 de un sistema experimental de calefacción, ventilación y aire acondicionado (Morilla, F., Garrido, J., & Vázquez, 2013).

1.6 Aplicaciones con sistemas inteligentes

Los reguladores lineales cuadráticos son una variante muy apropiada para sistemas representados por ecuaciones de estado. Suponiendo que todo el estado del sistema se puede medir, es posible diseñar un control de realimentación de estado, que permita calcular una ley de control u . Y así minimizar el valor de la función objetivo de tipo cuadrático. Tal como se desea aplicar a la columna de destilación de este trabajo y que se aprecia en el Anexo F.

Hay otros ejemplos como el de Sckoert and Rawlings, en donde se muestra como diseñar un controlador MPC con horizonte finito equivalente a un LQR (Regulador Lineal Cuadrático) (Scokaert, P., & Rawlings, 1988), (Rawlings, J., Mayne, D., & Diehl, 2012), (Yiqun, Y., & Ming, 1992) , que se podrían considerar como futuras prácticas en el MFC.

1.6.1 Lógica Difusa

Una de las características más importantes de la Lógica Difusa, es que permite la utilización del lenguaje natural para representar el conocimiento sobre un sistema mediante lo que se denominan variables lingüísticas. Estas variables toman valores difusos, valores definidos mediante conjuntos difusos, los cuales son caracterizados por una etiqueta lingüística. De esta forma, el significado de una variable lingüística puede ser interpretado como una restricción elástica de su valor, es decir, un valor dotado de imprecisión. Esta característica permite la realización de modelos cualitativos de gran valor en diferentes campos del saber, debido fundamentalmente a su capacidad de reflejar de forma fácilmente interpretable fenómenos muy complejos y difícilmente modelables de forma analítica (Grande, J., Aroba, J., De La Torre, M., & Beltran, 2005), (Jiménez, A., Aroba, J., De La Torre, M., Andújar, J., & Grande, 2009), (Morales, 2002), (Ponce , 2012), (Zadeh, 1973), (Takagi, T., & Sugeno, 1983), (Villeta, M., Lahera, T., Merino, S., Zato, J., Naranjo, J., & Jiménez, 2012).

Desde el punto de vista del control, S. Assilian y E. H. Mamdani, del Queen Mary College de Londres, establecieron en 1974 el primer hito en cuanto a aplicación industrial de la lógica borrosa, el ya histórico primer controlador difuso basado en reglas lengüística de un generador de vapor (Mamdani, E., & Assilians, 1975).

Este sistema de control basado en lógica difusa fue uno de los frutos de la Tesis Doctoral de S. Assilian (Assilian, 1974), y supuso uno de los grandes impulsos que recibió la Lógica

Difusa en sus inicios, los cuales le permitieron pasar de un marco teórico a aplicaciones industriales reales en solo unas décadas.

1.6.2 Sistemas difusos híbridos

Desde el momento en el que la Lógica Difusa se hizo popular a nivel industrial, se comprobó que el desarrollo de un controlador difuso con un buen rendimiento no era una tarea sencilla. La búsqueda de las funciones de pertenencia y las reglas adecuadas son un proceso tedioso de prueba y error, aún más en sistemas complejos. Además, era necesario poseer algún mecanismo de adaptación o aprendizaje de los sistemas reales (desgastes, holguras, etc.).

En este contexto y con las redes neuronales ya bastante desarrolladas por los siguientes autores: (Rosenblatt, 1958), (Brandstetter, 2014), (Anderson, J., Silverstein, J., Ritz, S., & Jones, 1977), (Hopfield, 1982), (Grossberg, 1987), (Kohonen, 1988), los eficientes algoritmos de aprendizaje de las redes neuronales se presentaron como la solución ideal para automatizar este proceso de diseño. Así, (Hayashi, I., & Takagi, 1991) desarrollaron el primer algoritmo que empleo una red neuronal para diseñar las funciones de pertenencia de un modelo difuso, creando así el primer sistema neuro-difuso (Yin, H., Silver, W., & Buckley, 1990), (Zhao, Z, Tomisuka, M., & Isaka, 1993), (Santos, M., Dormido, S., & De la Cruz, 1996), (Mudi, R., & Pal, 1999), (Tang, k., Man, K. F., Chen, G., & Kwong, 2001), (Andújar, J., & Barragán, 2014).

Luego de analizar los diferentes algoritmos de control usados en la minería, específicamente en la trituración de material y destilación de una mezcla binaria, se puede concluir que los basados en sistemas inteligentes son los más usados y los que mejores resultados han dado. Es bueno destacar, que no se ha encontrado ningún sistema inteligente aplicado a los laboratorios virtuales a nivel académico, y que al

implementarlo en esta tesis **resaltara la novedad de la misma.**

1.7 Conclusiones parciales:

1. De la búsqueda realizada de laboratorios virtuales y/o remotos se encontró que en abril del 2016 había 3 000 artículos al respecto, pero en junio de este mismo año ya eran 6 000 artículos escritos, de los cuales solo 84 eran dedicados a dar solución al consumo energético y mejorar la eficiencia a través del control automático del proceso de trituración de cobre y de destilación de columnas binarias.
2. La búsqueda bibliográfica también permitió conocer de redes de universidades como es el caso del MacroLaboratorio de Formación Conjunta (al que pertenece la UNL), que se dedican en Suramérica al estudio del control automático a través de laboratorios virtuales.
3. De la búsqueda bibliográfica se pudo notar que cada vez se utilizan más laboratorios en tiempo diferido por lo complicado que resulta implementar laboratorios remotos, principalmente por los problemas generados por gestión que se dan cuando se tienen que soportar muchos usuarios a la vez y por la naturaleza del experimento cuando por ejemplo son controlados con controladores PID, ya que se necesitaría que pase más tiempo.
4. Es importante indicar que el controlador basado en LQR da muy buenos resultados, en el proceso de trituración de cobre, así como en el refinamiento de una sustancia, pero que su implementación es más compleja, ya que es necesario en las simulaciones conocer el valor de los estados intermedios. Para su implementación real se necesita de métodos de estimación complejos como los Observadores de Luenberger o los filtros de Kalman, esta es una de las

razones por lo que los controladores han encontrado pocas aplicaciones en la práctica y una de las razones más importantes para que no se tenga en cuenta en este trabajo.

CAPÍTULO II

IMPLEMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA VIRTUAL SOBRE MOODLE

El laboratorio de la Facultad de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables (FEIRNNR) de la UNL está destinado a facilitar los estudios prácticos y teóricos del control automático a los estudiantes de las carreras de: Electromecánica, Geología Ambiental y Ordenamiento Territorial, Electrónica e Ingeniería en Sistemas. Actualmente cuenta con 10 computadoras, cada una con características de hardware y software que se muestran más detalladas en el Anexo G.

Es así, que, con la finalidad de mejorar las herramientas del docente para enseñar, en la UNL desde el 2012, se empiezan a implementar las primeras prácticas para el aprendizaje de las técnicas de control automático sobre la plataforma Moodle.

Destacándose que cuando se plantean las prácticas del laboratorio relacionadas con la trituradora de cobre, así como con la columna de destilación binaria, incluyen la preparación metodológica del profesor, la guía de las prácticas, la información teórica, así como las orientaciones previas de los estudiantes, las cuales se pueden encontrar en el Anexo D.2.

Lo novedoso de la metodología implementada es que va ser evaluada por competencias, además del uso de SolidWorks para modelar procesos, lo cual parte de un dibujo e importándolo luego a un lenguaje basado en MATLAB® que está orientado a objetos, es decir, con el empleo de la caja de herramientas Simscape, se puede simular y animar sistemas físicos en 3 dimensiones dentro de Simulink, construyendo así nuevos dominios y nuevos componentes. Finalmente, se hace una evaluación estadística de las calificaciones obtenidas por los estudiantes de la UNL en la materia de control automático,

en los últimos cuatro años, para encontrar así los beneficios que se alcanzaron con el uso del LV.

2.1 Desarrollo e Implementación de Plataformas de laboratorio virtual en la UNL

En la UNL se han desarrollado algunos sistemas para el aprendizaje de técnicas de control automático sobre la plataforma Moodle. Destacándose de la implementación la del MFC (Macro laboratorio de Formación Conjunta), la cual consta de tres prácticas de laboratorio relacionadas con la industria minera del cobre, la destilación de petróleo y la robótica. En esta tesis se abordarán solamente las dos primeras, por su novedad y la importancia que tienen estos procesos para el desarrollo industrial de Ecuador, pero puede encontrarse una descripción de la última práctica en (Benavides, 2012).

Estas prácticas fueron desarrolladas para los estudiantes de las universidades que forman el MFC (Fernández, M., Muñoz, C., Rubio, E., & Benavides, 2016). El MFC tiene como objetivo la implementación de laboratorios virtuales y remotos, cuya finalidad es permitir al estudiante a que adquiera los conocimientos y la experiencia necesaria para alcanzar un mejor desempeño profesional.

Para la implementación de esta metodología o estrategia didáctica (*uso de laboratorios en línea*) se consideró las diferentes prácticas que se han realizado en este tipo de laboratorio y que usan la herramienta de software libre Moodle, ideal por ser una plataforma educativa. Esta investigación aprovecha esta herramienta, para diseñar sus ambientes y utiliza su entorno, para montar las prácticas de laboratorio del control automático, establecer así las interacciones con sus alumnos, apoyándose de todas las facilidades que la misma brinda.

Por tanto, para definir una metodología se deben definir los siguientes aspectos:

- Tipo de diseño.
- Tamaño de la muestra y Características biopsicosociales de los estudiantes.
- Universo de estudio.
- Actividades.
- Recursos, Humanos y Materiales.
- Conectividad.
- Rúbricas.

Con toda la información correspondiente al entorno virtual Moodle, se procede a preparar la infraestructura de la red y los requisitos necesarios, para la correcta instalación, también se tiene que considerar la configuración del servidor de correo en Moodle. Finalmente, se planifica las prácticas, las cuales deben comprender de tres momentos: Inicial, desarrollo y finalización de la práctica.

2.1.1 Plataforma virtual desarrollada en la UNL, empleando Moodle y LabVIEW™

Esta plataforma fue desarrollada en el 2012 y realizaba una práctica remota de un brazo robótico tipo SCARA, desarrollado por estudiantes de la UNL, contemplando el programa LabVIEW™ que fue indispensable, para llevar a cabo el proceso de enseñanza-aprendizaje del taller de Control Automático, a los estudiantes de las diferentes carreras del FEIRNNR. *Las personas que accedían a la plataforma debían comprender, que van a estudiar de una forma teórica-simulada y práctica el tema de “Control Automático clásico y avanzado”.* Considerando que la distribución del personal que trabaja dentro del mismo está conformada de la siguiente manera:

- ✓ El administrador, responsable del Laboratorio de Automatización y también docente del Taller de Control Automático.
- ✓ Docentes, asignados para otros talleres y que también hacen uso del Laboratorio.
- ✓ Los estudiantes, de las distintas carreras que hacen uso del Laboratorio y del Taller de Control Automático según el horario establecido.

El administrador puede crear un laboratorio ingresando el nombre de éste y dando clic en el botón 'Agregar otro laboratorio', el laboratorio creado se visualiza en la parte superior de la tabla, esto se puede observar en la Figura 2.1, dicha interfaz fue desarrollada en el 2012 y sirvió como modelo para el desarrollo de las actuales prácticas del MFC, que se explicará en detalle más adelante.



Figura 2. 1 Crear Laboratorio, Fuente: Autor, (Arias, 2012).

Una vez agregado el laboratorio se agrega una planta haciendo clic en el nombre del laboratorio, creado anteriormente e introduciendo los datos del experimento y dando clic en *Agregar Nueva Planta*. Ahora ya está disponible la planta desde la plataforma, como se observa en la Figura 2.2.

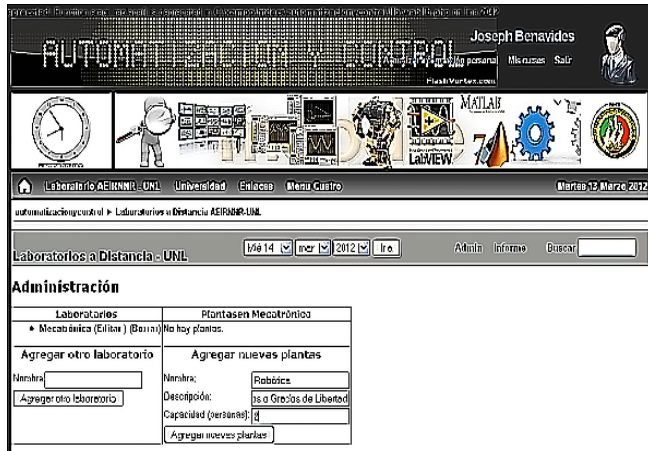


Figura 2. 2 Crear Planta, Fuente: Autor, (Arias, 2012).

El administrador puede editar un laboratorio desde la lista de laboratorios creados, haciendo clic en la opción 'Editar' e ingresando los datos del mismo, tal como se ve en la Figura 2.3.

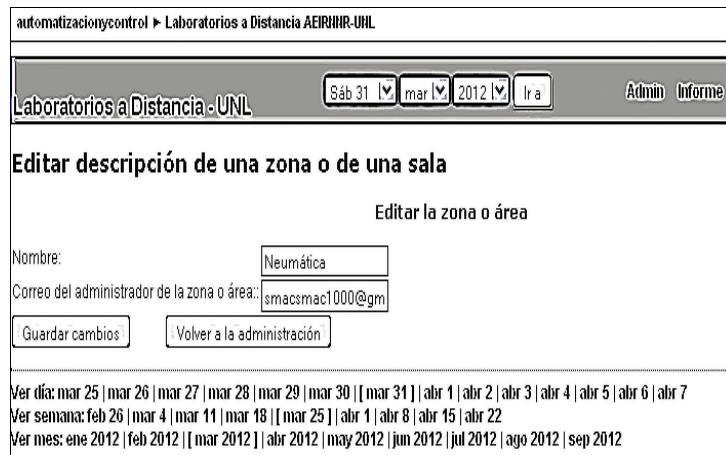


Figura 2. 3 Editar Laboratorio, Fuente: Autor, (Arias, 2012).

2.1.2 Laboratorio de Control Automático de la UNL, en tiempo Diferido

Otra alternativa para la implementación de laboratorios virtuales es la modalidad de tiempo diferido tal como se muestra en la siguiente dirección electrónica: <https://unl.labsland.com/?lang=es>.

Esta variante es empleada por algunas universidades y centros de educación en el mundo, ya que permite realizar un video de la práctica y esta es subida a la plataforma que administran los dueños del sitio, las ventajas son enormes al evitar los problemas que se presentan con laboratorios virtuales remotos, ya que son mucho más complejos de implementar.

Los datos que se deben proveer a LabsLand, son por ejemplo lo que se muestran en la Tabla 2.1, se podrá ver de esta forma en video o en tiempo diferido el peso del material triturado, cuando se empleen diferentes estrategias de control para cerrar en diferentes posiciones las mandíbulas del prototipo de trituración de cobre, así mismo, se aclara que el material se coloca en la tolva manualmente, sumando un tiempo adicional, para evitar saturación de las placas.

Tabla 2.1 Datos necesarios para iniciar con el experimento de la trituradora en tiempo diferido.

Interacción	Posición de mandíbulas	Peso de Referencia	Material	Video 1, Inicio	Velocidad Motor (1), Trituradora	Video 2 final	Velocidad Motor (2), Banda	Tiempo
1	Trituradora (180 grados)	2 kg	Mina	Planta trituradora	100 rpm	Incluida la banda	0,057 m/s	27 seg

2	Trituradora (360 grados)	2 kg	Mina	Planta trituradora	90 rpm	Incluida la banda	0,057 m/s	29 seg
3	Trituradora (540 grados)	2 kg	Mina	Planta trituradora	85 rpm	Incluida la banda	0,057 m/s	32 seg
4	Trituradora (720 grados)	2 kg	Mina	Planta trituradora	70 rpm	Incluida la banda	0,057 m/s	33 seg
5	Trituradora (Se escoge el ángulo)	2 kg	Río	Planta trituradora	Cualquier valor de rpm de los anteriores	Incluida la banda	Cualquier valor m/s de los anteriores	Cualquier valor de los anteriores

Fuente: Autor.

2.1.3 MacroLaboratorio de Formación Conjunta para Sistemas de Control Automático.

Este tiene como finalidad el de crear una propuesta de MacroLaboratorio de control automático, orientado a permitir el ingreso de los estudiantes de las 5 universidades (Universidad Central de las Villas, en Cuba, Universidad Nacional de Loja, en Ecuador, Universidad de Talca, Universidad de la Frontera y la Universidad del Bio Bio en Chile), y con la colaboración del CEAI_SENA-Regional Valle, Calí-Colombia.

Creando así grupos conformados por estudiantes de cada una de las instituciones, para que puedan trabajar en forma colaborativa. Esto no solo permitirá crear lazos de amistad, sino también desarrollar actividades conjuntas entre las instituciones involucradas, tanto en la modalidad presencial (el estudiante que está en la institución y que cuenta con el equipo de trabajo) como en la remota (los estudiantes que se encuentran en otra institución), lo cual se puede apreciar más en detalle en el Anexo C.

Para acceder a algunas prácticas del MFC (lo conforman tres universidades que son: UCLV, UPV, UBB), por ejemplo, el llamado SLD (Sistema de Laboratorios a Distancia) se debe visitar el sitio web: <http://sldubb.ubiobio.cl/>.

La unión de las tres universidades citadas anteriormente del MFC, conforma una red cada vez más sólida de enseñanza virtual y remota en el campo del control automático.

El sistema de laboratorios virtuales de la UNL, cuyo sitio es el siguiente: www.unl.edu.ec, luego dentro de esta página al reescribir la dirección mfc.unl.edu.ec, debe aparecer una ventana que indica que la conexión no es segura. Seguidamente, se debe seleccionar una configuración avanzada, que se debe ubicar al final de la página en el link de acceder a mfc.unl.edu.ec (sitio no seguro).

Todo lo anterior, se logra como parte de los sistemas que cada uno dispone mediante acceso remoto y utilizarlos en los momentos que no se estén empleando en actividades académicas presenciales. La UNL, aporta con dos procesos que son novedosos por su fabricación y por lo complejo de los mismos, que son: el de trituración y el de destilación de una columna binaria, respectivamente y que no han sido considerados por ninguna otra universidad, dentro de los laboratorios virtuales y remotos de control automático.

Así mismo, las universidades que se mencionaron cuentan con laboratorios de automatización, los cuales a raíz de convenios Marco firmado por estas universidades y la UNL, permiten acceder a sus instalaciones. Además, siempre se está postulando con el MFC a otros proyectos de equipamiento, de manera que esté disponible para ser utilizado por estudiantes, profesores e investigadores parcialmente a partir de mediados del 2017 y completamente a comienzos de 2018. Aunque en la actualidad se encuentra en la etapa de prueba.

El ambiente de trabajo que se ha desarrollado en la Universidad de Talca tiene como finalidad el de funcionar de manera similar a la expuesta con el SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje), la cual consta de una planta Festo PCS Compact Workstation, con presencia real y remota de estudiantes, trabajando en forma colaborativos. Los laboratorios de los centros de educación que se indicaron anteriormente colaboran con este MFC, con algunos bancos de prácticas al igual que lo hace la UNL, con los dos prototipos señalados uno relacionado con la trituración de cobre y el otro con una columna de destilación binaria.

Este último es solamente analizado en forma teórica, aunque en la actualidad es parte de un proyecto aprobado para su construcción, por lo que a continuación se adjunta en el Anexo E, la carta de aceptación por parte de la UNL, que permite el desarrollo del diseño y construcción de una columna de destilación binaria.

El formato de las guías de práctica se puede ver en el Anexo D.2 y también se las puede apreciar en la página del MFC de la UNL. Es posible cambiar el contenido de los mismos en dependencia de los procesos que se vayan a tratar en ese momento con los estudiantes. Ya que debido al espacio a usar no se puede poner más de una cierta cantidad de prácticas, luego evaluarlas y cambiarlas, esto lo puede hacer el

administrador de la plataforma que generalmente es el docente que imparte la materia.

Conectividad del MFC, La UNL actualmente mantiene un contrato para servicio de la red avanzada, con el Consorcio Ecuatoriano para Desarrollo de Internet Avanzado (RedCEDAI) GLOSARIO, de la cual forma parte la Cooperación Latino Americana de redes avanzadas (RedCLARA), para que instituciones de educación superior formen parte del MFC y así de esta forma tenga conexión con esta red avanzada.

2.2 Arquitecturas de las prácticas de Trituración y de Columnas de Destilación Binaria

Para una mejor comprensión de los estudiantes del refinamiento de petróleo, se analizará una columna de destilación binaria, que representa una forma simplificada de este proceso. Para esto se van a emplear datos de un evento IFAC, que con la ayuda de MATLAB®/Simulink permite conocer su comportamiento. Toda la práctica se muestra en el Anexo E.

Las dos prácticas planteadas: la de trituración de cobre y la de columnas de destilación binaria tienen arquitecturas diferentes, tal como se puede apreciar en la Figura 2.4, en donde los componentes digitales son solo usados por la práctica de trituración, pero que podrían ser usados en el futuro por la columna de destilación binaria, ya que este proceso es una práctica controlada virtualmente en la actualidad. Los señalados con rojo en la Figura 2.4, son proyectos que se están ejecutando o que se pueden ejecutar próximamente en la UNL.

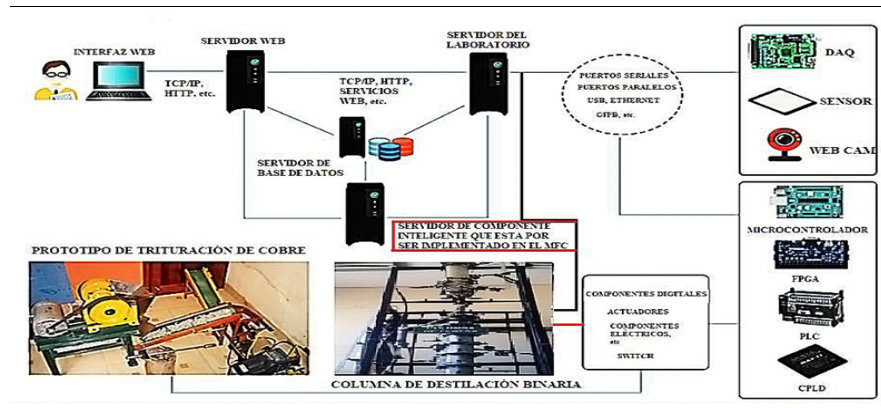


Fig. 2.4 Arquitectura del MFC de la UNL, para la práctica remota de trituración y virtual para la práctica de la Columna de Destilación Binaria, Fuente: Autor

2.3 Criterios que se consideraron para elegir la Metodología Didáctica

Con la fundamentación teórica del tema, se puede seleccionar la estrategia adecuada para que se corresponda con la didáctica específica del área o asignatura a trabajar. A continuación, se consideraron los siguientes aspectos de la metodología didáctica:

Tipo de diseño. La investigación es de tipo científico, diseño metodológico experimental, expositiva, interactiva, de descubrimiento, de carácter descriptivo, enfoque cuantitativo y cualitativo. Información que permite determinar la naturaleza de este proyecto y así, seleccionar de forma correcta la mejor estrategia a emplear en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la materia de control automático.

La metodología que se desarrolla debe interactuar dependiendo del momento del curso entre la teoría, la simulación y la práctica y en ninguno de los casos va ser la misma, Además, siempre su finalidad es la de ayudar a

desarrollar la formación integral del estudiante (cuyas bases son las actitudes y los valores) considerando que en este caso el docente es el eje principal.

Tamaño de la muestra y Características biopsicosociales de los estudiantes. El marco de muestra para la aplicación de los cuestionarios se aplica al 100 % de los estudiantes del sexto ciclo de Control Automático, que dependiendo que, si hay en este período uno o dos paralelos, no superan los 30 y 60 estudiantes, respectivamente, dentro de un promedio de edad que fluctúa entre los 20 a 25 años, aclarando que con raras excepciones se supera esta edad.

Universo de estudio. Es definido por los estudiantes del sexto ciclo de la carrera de ingeniería electromecánica, cuya identificación dentro de la malla aprobada en el 2017 en la UNL, es denominada Aplicaciones Específicas Electroenergéticas. Además, el estudiante que esté matriculado en control automático debe haber aprobado materias como prerrequisitos las materias: Ecuaciones Diferenciales y Termodinámica y como correquesitos, materias transversales, por ejemplo, Electrónica de Potencia, tal como se muestra en el Anexo D.1.1.

Adaptándose esta metodología al programa de estudios, para la articulación con las otras materias.

2.3.1 Planificación de la clase por competencias

Primeramente, se deben definir y explicar cómo se van articular las actividades, técnicas y recursos para que los estudiantes puedan obtener los logros que previamente se han determinado con la metodología aplicada. Así también, se debe considerar que para ser competente se une saberes de muy distintos tipos, por tanto, se deben desarrollar habilidades cognitivas, socioemocionales, afectivas, actitudes, técnicas y procedimientos.

Actividades. Se las define como no estandarizadas, ya que no tienen ninguna rigurosidad, aparecen de la necesidad del docente, de lograr un tipo de aprendizaje por competencias, colaborativo y basado en la investigación. Para las prácticas virtuales el estudiante debe dibujar la trituradora y la columna de destilación binaria, en SolidWorks para luego importarlos al ambiente MATLAB®/Simulink, de esta manera puede aprender otra forma de modelar y aplicar estrategias de control en tiempo simulado.

Entre las actividades en tiempo simulado o virtual que abarcan tanto a la trituradora (la primera y cuarta varían ya que son para la trituración) como a la columna de destilación están las siguientes:

- Comprobar curvas de calibración para sensores, registrar mediciones con los sensores y comparar con otro instrumento patrón para ajustar polinomio. Realizar esta actividad para varios sensores distribuidos en la trituradora.
- Comprobar curva de calibración para actuadores, registrar señal enviada al actuador y medir con instrumento patrón para ajustar polinomio. Realizar esta actividad para 5 actuadores, es decir, 5 motores a diferencia de los tres motores PAP, que se emplean en la actualidad.
- Diseñar y evaluar el algoritmo de control en lazo cerrado aplicado a la trituradora.

Todo lo anterior actuando sobre la actual enseñanza-aprendizaje de CA que se distribuye a través de 6 horas semanales, lo que da un total de 128 horas durante todo el ciclo, divididas en 64 horas de teoría y 64 horas de prácticas a lo largo de 21 semanas que comprende el ciclo, con un total de número de créditos de 6, tal como se contemplan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Componentes teóricos, simulados y remotos unidos por la metodología propuesta, considerando como ejemplo el inicio y el final de todas las prácticas del curso.

<i>Número de semanas</i>	<i>Ambiente</i>	<i>Contenido de la materia (sílabo de CA, Anexo D).</i>	<i>Evaluaciones (6 puntos), es decir, 4 pruebas de 1,5 puntos cada una.</i>	<i>Prácticas en el Laboratorio virtual, remoto y real de Automatización y Control (2,5 puntos).</i>	<i>Deberes, cuadernos, exposiciones, participación en clase (1,5 puntos).</i>
21 semanas	Aula, Laboratorio de Automatización y MFC.	Son en total 8 unidades durante todo el curso de CA.	Exámenes teóricos en clase.		Estos valores se promedian con todos los presentados durante el ciclo

Fuente: Autor.

Técnicas. A diferencia de las actividades se encuentran estandarizadas y deben regirse a un plan de clases establecido, es decir, debe seguir el sílabo aprobado por la carrera de Ingeniería Electromecánica (CIE), mismo que se indica en el Anexo D.

Recursos. Son el conjunto de personas o bienes materiales con que se cuenta para desarrollar una actividad, de esta forma se clasifican en:

Humanos. Recursos de personas, que se integró al aula, sin considerarlo al docente y alumnos porque son los actores principales del proceso. Además, están los agentes externos que se traen al aula para realizar alguna actividad, estos pertenecen a los demás centros con los que la universidad

interactúa, por ejemplo, el MFC y la Universidad Estatal de Guayaquil.

Materiales. Se dividen en dos:

Instruccionales. Están hechas a propósito para el aprendizaje, por ejemplo, las guías del curso que se las encuentra en el Anexo D.2.

Recursos/materiales didácticos como son: Software educativo MATLAB®/Simulink (reconocer instrumentación con Real Time Workshop), Easy Java Simulations (Ejs) y LabVIEW™, computadoras, proyector y libros que se presentan en la bibliografía del sílabo y que puede descargarse de la página de la UNL.

Educativos, todos aquellos materiales que no están hechos para el aprendizaje pero que el docente lo integra al aula, transformando por ejemplo una planta (aquí se puede destacar el prototipo de trituración desarrollado en la UNL), el docente lo transforma en un recurso educativo para el desarrollo de una práctica, lo que se conoce también como transposición didáctica, y que se presenta a continuación.

2.3.2 Práctica de la I y II unidad, en tiempo teórico y simulado, basada en Aprendizaje por competencias

Las competencias no se desarrollan de un ciclo para otro, por lo que se presenta desde los primeros ciclos del estudiante, ya que se logran a largo plazo y progresivamente, principalmente porque involucra el desarrollo de muchas capacidades, habilidades, aptitudes etc. Para lograrlo se debe desarrollar las capacidades y si no se logra hay que retroalimentarlas hasta lograrlas. En general este proceso consta de tres momentos, como iniciar, desarrollar y finalizar la clase.

Inicio. El docente define cuáles son sus tareas y las del estudiante, así como el tiempo para cada una de ellas, de

manera que el estudiante relacione sus experiencias con los contenidos centrales y específicos a desarrollar de cada tarea.

Destacándose desde este momento la clase teórica que el alumno recibe en las aulas de la CIE, reforzándose el criterio que nadie puede ser competente si no tiene los conocimientos y en tiempo simulado en la plataforma MFC. Abarcando temas relacionados con las propiedades y teoremas de la Transformada de Laplace, Transformada Inversa, entre otros. Para concluir esta etapa, el estudiante cuenta con 20 horas según el sílabo de la CIE, de las cuales 11 horas recibe de formación en el aula completando así el componente teórico de la metodología y las otras 9 horas se dividen entre el MFC y LA (Laboratorio de Automatización), tal como se puede apreciar en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Componentes teóricos y simulados, unidos por la metodología propuesta.

<i>Nº de Horas</i>	<i>Número de semanas</i>	<i>Ambiente</i>	<i>Contenido de la materia (sílabo de CA, Anexo D).</i>	<i>Evaluaciones (6 puntos), es decir, 4 pruebas de 1,5 puntos cada una.</i>	<i>Prácticas en el Laboratorio o virtual, remoto y real de Automatización y Control (2,5 puntos).</i>	<i>Deberes, cuaderno, exposiciones, participación en clase (1,5 puntos).</i>
<i>Se dividen para la I y II unidad de la siguiente manera: INICIO</i>						
4	1 semana	3 horas Aula y 1 hora MFC	<i>I unidad. Introducción a los sistemas de control.</i>	Repaso por parte del estudiante.	Repaso por parte del estudiante.	Estos valores se promedian con todos los presentados

						durante el ciclo
16	3 semanas	8 horas Aula, 6 horas Laboratorio de Automatización y 2 horas MFC.	II unidad. Herramientas para el análisis de sistemas de control.	I evaluación teórica de las dos primeras unidades por 1,5 puntos	La práctica remota y virtual tienen una nota de 0,3 puntos; y la práctica real tiene una nota de 0,3 puntos, dando un total de 0,6 puntos.	Estos valores se promedian con todos los presentados durante el ciclo.

Fuente: Autor.

Desarrollo. Con los conocimientos teóricos necesarios impartidos por el docente, el estudiante podrá acceder a la plataforma virtual de acuerdo a un nivel de acceso que le permitirá realizar su práctica, una vez dentro de la plataforma virtual el estudiante debe entrar al sitio del MFC, donde deberá construir significativamente el conocimiento adquirido, cumpliendo con un manejo apropiado de la información, es decir, un buen uso de los conceptos de la materia. Lo que acarrea que el estudiante tenga un perfecto manejo de los mismo, y lo más importante en las prácticas que se realizan más adelante podrán transferir y aplicar estos conocimientos. La pantalla principal que brinda este sitio para estas dos primeras prácticas se muestra en la Figura 2.5.

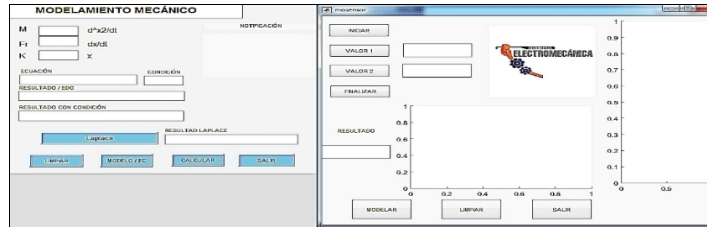


Fig. 2. 5 Pantalla de inicio para realizar la práctica de la I y II unidad, donde se estudia la Transformada de Laplace y modelamiento matemático de diferente naturaleza, Fuente: Autor.

Final. El docente se encarga de tomar la primera evaluación escrita de estas dos unidades sobre 1,5 puntos y sumarle 0,6 de las prácticas virtuales ya que no existe en esta unida ninguna práctica remota ni real.

2.3.3 Práctica de la VII y VIII unidad, en tiempo teórico, simulado y remoto, basada en competencias

En esta práctica se puede probar algunas variantes de reguladores vistos en teoría (reguladores PID, MPC, LQR, Predictor de Smith, etc.). Además, del cambio de consigna en la entrada del prototipo de trituración y así determinar el desempeño en ciertas condiciones por medio de MATLAB®/Simulink y el uso del software Easy Java Simulations (EJS).

Arquitectura del proceso de trituración remoto. Los experimentos se ejecutan sobre un prototipo a escala de laboratorio. Este tipo de arquitectura consta de dos agentes:

- El cliente se ejecuta sobre una computadora, con un algún tipo de sistema operativo (el de la UNL es XP), el cliente envía comandos y/o parámetros al servidor (Hilo transmisor). Y a su vez recibe datos cuando se produce una interacción de usuario, cuya información es enviada por el servidor (Hilo receptor).

- El servidor ejecuta tres hilos de manera concurrente, el bucle que realiza la adquisición de datos y control de lazo cerrado. (Hilo de adquisición de datos y control) se ejecuta de forma determinística en base a los comandos recibidos desde la aplicación cliente (Hilo Analizador de comandos) y al mismo tiempo envía el estado de la planta a la aplicación cliente (Hilo Transmisor), esto se puede apreciar en la Figura 2.6.

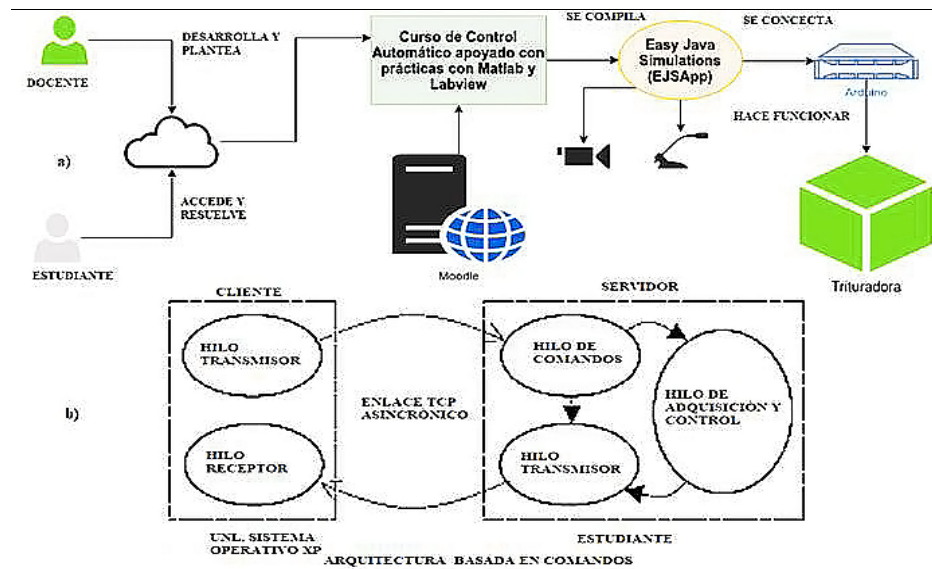


Fig 2.6 a) Propuesta de arquitectura basada en comandos de la UNL, Fuente: Autor, b) Arquitectura basada en comandos, Fuente: (Vargas, H., Sánchez, J., Jara., Candelas, C., Reinoso, O., & Diez, 2010).

El departamento de informática y de redes ha implementado para lograr esto, algunas aplicaciones que son especialmente adecuadas para el desarrollo de laboratorios virtuales en Internet, como son: LabVIEW™, MATLAB®, Easy Java Simulations (Ejs).

Para el desarrollo del lado cliente se ha creado una librería que implementa la librería de Hilos Transmisor e Hilo receptor. Desde el punto de vista del servidor, este consta de un módulo de comunicación genérico desarrollado en LabVIEW™, para el brazo robótico y en MATLAB®, para la trituradora y la columna de destilación binaria.

Las arquitecturas utilizadas, permitirán aplicar y ensayar las estrategias de control propuestas en esta tesis como son: PID, Predictor de Smith, LQR, MPC y Lógica Difusa. Además, con la posibilidad de que el estudiante pueda seguir probando otras más, eso sí, siempre fundamentadas en la arquitectura cliente/servidor.

El modelo para la evaluación de competencias, está orientado a soportar la toma de decisiones para un Sistema de Laboratorios Virtuales y a Distancia, se basa en tres etapas básicas: entrada, procesamiento y salida de información, las que se presentan a continuación.

Inicio. El estudiante en este momento del curso ya tuvo que haber estudiado 6 unidades que se muestran en el sílabo de la CIE en el Anexo D, en las cuales, esta práctica tiene el componente teórico, simulado y real. El primero en las aulas de la CIE, el del tiempo simulado en la plataforma MFC y del tiempo real en el laboratorio de Automatización y Control. Los temas que se abarcan están relacionados principalmente con sistemas con retardo, lugar geométrico de las raíces, diseño de controladores PID y otras variantes, tal como se explica en la Tabla 2.4. El estudiante tiene 52 horas según el sílabo de la CIE, para concluir esta etapa, de las cuales 26 horas recibe de formación en el aula completando así el componente teórico de la metodología.

Tabla 2.4 Componentes teóricos, simulados y remotos, unidos por la metodología propuesta.

<i>Nº de Horas</i>	<i>Número de semanas</i>	<i>Ambiente</i>	<i>Contenido de la materia (sílabo de CA, Anexo D).</i>	<i>Evaluaciones (6 puntos), es decir, 4 pruebas de 1,5 puntos cada una.</i>	<i>Prácticas en el Laboratorio virtual, remoto y real de Automatización y Control (2,5 puntos).</i>	<i>Deberes, cuaderno, exposiciones, participación en clase (1,5 puntos).</i>
<i>Se divide para la VII y VIII unidad de la siguiente manera: MOMENTO FINAL</i>						
16	3 semanas	8 horas Aula, 6 horas Laboratorio de Automatización y 2 horas MFC.	<i>VII unidad. Sistemas con retardo, lugar geométrico de las raíces.</i>	Repaso por parte del estudiante.	La práctica remota y virtual tienen una nota de 0,3 puntos; y la práctica real tiene una nota de 0,3 puntos, dando un total de 0,6 puntos.	Estos valores se promedian con todos los presentados durante el ciclo
36	6 semanas	18 horas Aula, 12 horas Laboratorio de	<i>VIII unidad. Diseño de controla</i>	IV evaluación teórica de las	La práctica remota y virtual tienen	Estos valores se promedian con

		Automatización y 6 horas MFC.	dores PID y otras variantes	dos primeras unidades por 1,5 puntos	una nota de 0,4 puntos; y la práctica real tiene una nota de 0,3 puntos, dando un total de 0,7 puntos.	todos los presentados durante el ciclo.
--	--	-------------------------------	-----------------------------	--------------------------------------	--	---

Fuente: Autor.

2.3.4 Desarrollo de las competencias en tiempo virtual o simulado de la Trituradora

Con los conocimientos teóricos necesarios impartidos por el docente, el estudiante es capaz de realizar las prácticas, ya que tiene las actitudes y habilidades cognitivas, relacionales y la habilidad para solucionar problemas. Prevalece en esta práctica el modelo conductista, donde el docente lo guía al alumno y constructivista donde el alumno es más independiente. Su acceso a la plataforma virtual se efectúa de acuerdo a un nivel de acceso que le permitirá realizar su práctica.

Una vez dentro de la plataforma virtual el estudiante debe entrar al sitio del MFC y a partir de situaciones desafiantes mejorar sus competencias. Es así, que los estudiantes y las personas que accedan a esta plataforma puedan comprender y aplicar técnicas de control clásicas (PID, Predictor de Smith) y avanzadas (MPC, LQR, Lógica Difusa). Además, a partir de situaciones significativas o problemáticas (reales o simuladas de ciertos ambientes de trabajo), el estudiante deberá

proponer cual es la mejor estrategia de control que se debe aplicar al prototipo.

Otro punto que se optimiza en el deseo de mejorar las capacidades del estudiante, es ir de lo general a lo particular y viceversa. Por ejemplo, con los dibujos realizados de todas las piezas que forman el prototipo de trituradora del tipo mandíbula y de la columna de destilación binaria del modelo por platos, en SolidWorks.

Para luego importarlo al dibujo a MATLAB®/Simulink y obtener así una animación más real del proceso al simularlo en 3D. Además, que le permite al estudiante aplicar diferentes situaciones con diferentes niveles de complejidad, de manera que contribuya a desarrollar sus competencias.

A continuación, en la Figura 2.7 a la izquierda, se muestra una captura de pantalla de la simulación en 3D. En esta imagen los círculos negros representan los puntos críticos, donde se deben colocar sensores, actuadores y controladores. Para lograr el control del mismo se implementan los diferentes algoritmos de control que se analizan en el tercer capítulo. Finalmente, a la derecha de esta imagen se muestra el proceso cuando se dibuja en SolidWorks y se importa a MATLAB®/Simulink.

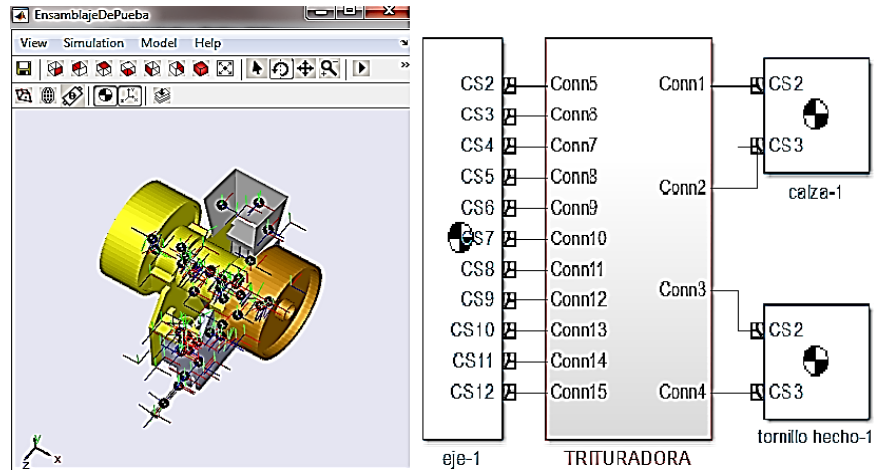


Figura 2. 7 Simulación en 3D de la trituradora a la izquierda y lo que se genera automáticamente en diagrama de bloques a la derecha, Fuente: Autor.

Final. El docente se encarga de evaluar del curso sobre 1,5 puntos y sumarle 0,6 de las prácticas virtuales, remotas y reales.

La autoevaluación, En el caso de los estudiantes de la UNL se ejercitan y experimentan de manera que transfieren sus aprendizajes en condiciones distintas o predeterminadas al simular y controlar ciertos parámetros del proceso de trituración.

2.3.5 Práctica en tiempo remoto de la Trituradora

Prevalece el modelo cognitivista al integrar varias estrategias metodológicas como son: la constructivista, Métrica, XP (Programación Extrema) y metodología Blended Learning (b-Learning), aprovechando la herramienta de Moodle y se diseñan sus ambientes tal como se muestra en el epígrafe 2.1.

La práctica se realiza empleando el prototipo que es usado para ejecutar los procesos de minería de cobre, específicamente la trituración del material de la mina. El mismo que fue

desarrollado en la UNL, con la finalidad de optimizar este proceso, principalmente con el objetivo de implementar algunos algoritmos de control y que aplique una teoría constructivista con el alumno.

No debe existir más de una sesión programada por semana en el laboratorio virtual y/o remoto, dependiendo de la complejidad de la misma el estudiante tiene aproximadamente dos horas para el guion realizado por el profesor. Por otra parte, el laboratorio virtual de la UNL tiene diez puestos con capacidad, para 3 alumnos por máquina para un total de 30 estudiantes, lo que implica que se tengan que formar varios grupos de prácticas. El docente organiza a los estudiantes en grupos de no más de cinco integrantes y los integra a través de componentes teóricos, simulados y prácticos de la materia.

El principal beneficio para los estudiantes es la combinación de las prácticas presenciales y las remotas, ya que las horas presenciales permiten conocer y manipular directamente equipos físicos y las horas de trabajo remotas, facilitan el ensayo de diferentes algoritmos, técnicas de control, sin las restricciones que implica un horario presencial

Materiales y equipos empleados. Todos los materiales y equipos empleados se los presentan en el Anexo G y G.1.

Los esquemas obtenidos e implementados para el control se los explica más en detalle en el capítulo III.

Final de la práctica en tiempo remoto. Seguidamente, para evaluar las evidencias generadas el docente se centrará en los niveles de participación activa en diferentes roles e integración del estudiante, así como en la cantidad y calidad de saberes demostrados. Por ejemplo, el estudiante tendrá que demostrar el control del cierre de las mandíbulas de la trituradora para obtener finalmente un mejor peso de material triturado a la salida del conjunto de trituradora-banda y zaranda.

De esta manera el estudiante podría obtener una calificación de 0,2 práctica remota y 0,2 en la práctica en tiempo real, ambas prácticas se ejecutarían en el MFC y laboratorio de Automatización y Control, respectivamente,

La autoevaluación. En el caso de los estudiantes de la UNL se ejercitan y experimentan de manera que transfieren sus aprendizajes en condiciones distintas o predeterminadas al simular y controlar ciertos parámetros del proceso de trituración como son: velocidad de las bandas transportadoras que transportan el material triturado, uso de metodologías para identificación de modelos matemáticos, implementación de sensores y actuadores que se mencionan en la tabla de materiales

Colaborativo. Se evalúa el trabajo conformado por el grupo de cuatro a cinco estudiantes, conformados por afinidad y por sugerencia del docente, los estudiantes tienen dos horas para realizar la práctica, entrando por niveles de acceso cada uno de los integrantes del grupo, es decir, se le asigna un día por grupo para que realicen esta práctica.

Al final el estudiante debe tener el criterio de. Conocer la información (explicándosela, que sea capaz de recordar y repetir, esto se revisa con el avance programático), Comprender la información (sea capaz de explicar y para frasear) y finalmente manejar la información (De manera que sea capaz de utilizar, aplicar y transferir, evitando que lo aprendido sea puro conocimiento y memorización, cuando debería ser comprensión y razonamiento).

2.4 Implementación de la práctica de trituración

Para la implementación de esta práctica se parte del diseño y construcción de un prototipo el cual en la actualidad está en al UNL. A continuación, se explica cómo se realizó esto:

Esta práctica se realiza con un prototipo desarrollado en la UNL, procesó de fabricación que se explica más adelante, es decir, no es un procesó simulado como el de la columna de destilación, ya que la maqueta se conecta al estudiante a través de la plataforma virtual.

2.4.1 Diseño y cálculo del prototipo de trituración

Para el diseño del proceso de trituración tipo mandíbula se observó el modelo de fabricación alemana Retsch, como el que se muestra en la Figura 2.8, al cual se le agregó un tambor lateral.



Figura 2.8 Fotografía del Prototipo de trituración desarrollado en la UNL a la izquierda y el que se tomó como modelo para su fabricación, desarrollado en Alemania y de marca Retsch, derecha, Fuente: (Benavides, 2014).

Las etapas de trabajo se limitaron a dibujar un prototipo de trituración utilizando el modelo de referencia y con la ayuda de softwares de diseño gráfico (herramientas CAD) como: SolidWorks y AutoCAD lograr obtener algunos datos de diseño como son: gráficas de desplazamiento, tensión y deformación de las placas utilizadas en la trituradora, entre otros, así también, algunos planos realizados en AutoCAD, sirvieron para la construcción de este prototipo.

Posteriormente, lo que resta es llevar estos planos y datos de los materiales a utilizar al taller mecánico, para que sumado a la experiencia de técnicos en construcción de maquinaria de minería puedan construir un prototipo a escala de laboratorio de la trituradora. Para mayor información de la construcción y que se pueda revisar más en detalle los planos de la trituradora y sus accesorios. Ver el Anexo F, mismos que sirvieron para iniciar el proceso de patentar este prototipo a escala de laboratorio y que se muestra en Anexo B.

2.4.2 Modelado de la Trituradora

Para realizar la identificación del sistema, se hizo uso de datos experimentales y se utilizó una herramienta fácil de usar, como es el MATLAB®. Se desarrollaron las siguientes etapas:

- Diseño y construcción de la trituradora.
- Obtención del modelo matemático.
- Utilización del Arduino.
- Simulación del modelo matemático de la trituración, cuando se le aplican diferentes estrategias de control, utilizando para esto MATLAB®/Simulink.

2.4.3 Identificación del modelo de control de la trituradora

En la Figura 2.9, se muestra una foto de la trituradora en la que se indican las señales de entrada, salida y las dos perturbaciones.

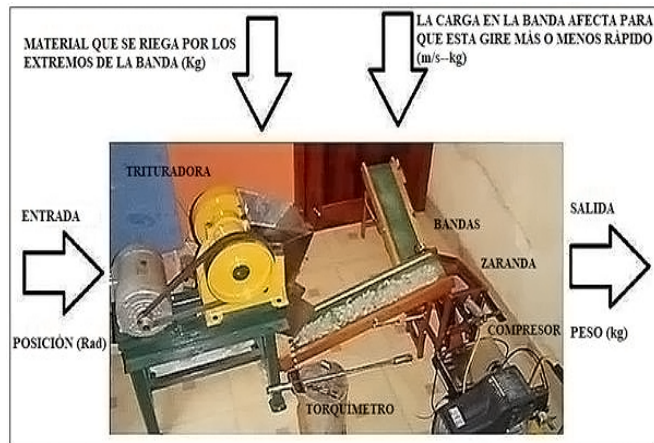


Figura 2.9 Foto de la trituradora en la que se indican las señales de entrada, salida, las perturbaciones y el nombre de algunos de los materiales empleados en esta práctica, Fuente: Autor.

Para proceder a la adquisición del peso a la salida de la trituradora se empleó una tarjeta Arduino, con las siguientes características:

- Las tarjetas están basadas en el microcontrolador Atmega de las versiones 168, 328, 1 280, y en la mayoría de los modelos su voltaje de trabajo está en un rango de 7 a 12V DC, aunque también se pueden alimentar con una fuente estabilizada de 5 V CD.
- La tarjeta ofrece una serie de entradas analógicas en base a 5V digitalizadas mediante un conversor A/D de 10 bits, lo que proporciona una resolución de 4,9 mV con una velocidad máxima de lectura de 1 024 lecturas por segundo.
- El intervalo de tiempo T entre dos muestras sucesivas se denomina periodo de muestreo o intervalo de muestreo, y su recíproco se denomina ($1/T = F_s$) velocidad de

muestreo, muestras por segundo o frecuencia de muestreo Hz.

- En cuanto a las salidas, Arduino ofrece salidas digitales en base a 3,3V o 5V según el modelo de tarjeta y salidas de tipo PWM, que generan una onda cuadrada estable con un determinado ciclo de trabajo, especificado por el programador y una frecuencia de 490 Hz (Valera, 2014).

2.4.4 Entrada de la tarjeta Arduino con una conexión de la celda de carga

La celda de carga cumple con un papel importante al crear una resistencia para la medición. Sin embargo, se necesita todo el sistema de adquisición para conseguir los datos y trabajar con ellos. Este acondicionamiento se indica en la Figura 2.12, en donde la resistencia de 333Ω es ajustada por ganancia. Entre el terminal de la salida y el terminal de la REF, se conecta un divisor de tensión que acondiciona la señal del sensor, permitiendo establecer la señal de salida del amplificador operacional en un rango entre -5 y 5 voltios para el A/D de la tarjeta Arduino.

El microcontrolador de la placa se programa usando el Arduino Programming Language (basado en Wiring 1) y el Arduino Development Enviroment (basado en Processing 2). Los proyectos de Arduino pueden ser autónomos o se pueden comunicar con un software que está en ejecución en un ordenador, en este caso el MATLAB®/Simulink (Morilla, F., Garrido, J., & Vásquez, 2013).

Seguidamente, se muestra el software y hardware utilizados en esta tesis, en Anexos H e I, quedando conectados tal como se ve en la Figura 2.10, el experimento se realiza en lazo abierto. Las mediciones obtenidas se logran al cerrar manualmente un torquímetro digital. Que a su vez permite el cierre de las placas de la trituradora en 4 posiciones (0 Rad , $\Pi \text{ Rad}$, $3\Pi/2 \text{ Rad}$, 2Π

Rad), siempre con el objetivo de obtener una mejor trituración del material.



Figura 2.10 Diagrama funcional de la instrumentación utilizada en el proceso de trituración objeto de estudio, Fuente: Autor.

2.5 Sistema de adquisición y calidad de los datos requeridos

Después de la recolección de datos siempre es necesario hacer un análisis estadístico de las mediciones obtenidas, además el análisis gráfico de las curvas de respuesta del tiempo y frecuencia. Esto permite determinar las relaciones entre las señales de entrada y salida de manera cuantitativa y examinar la calidad de las mediciones, el comportamiento de las variables y comprobar la presencia de ruido y retardos (Sierra, 2012).

En caso de no poseer un sistema de adquisición de datos, el programa MATLAB® es la herramienta que permite agrupar y realizar el análisis de todas estas mediciones, esto es, el análisis gráfico, el análisis estadístico y el análisis de señales en el dominio de las frecuencias, así que ésta es la herramienta básica para los CADCS. Para este caso, se procede a cargar los datos previamente distribuidos.

La señal analógica del proceso es el peso y fue muestreada con una tarjeta Arduino, pero siempre teniendo en cuenta que las limitantes de cualquier tipo de tarjeta de adquisición de datos DAQ, es que llegan solo hasta un valor determinado de tiempo de muestreo. En este caso fue suficiente la cantidad de muestras que se obtienen con la tarjeta Arduino.

2.5.1 Adquisición de datos con Arduino Mega

Para la adquisición de datos se debe considerar que los programas tengan los siguientes componentes:

- MATLAB®/Simulink.
- Desarrollo del programa en Arduino para adquisición de la celda de carga.

Antes de conectar la tarjeta, lo primero que se debe hacer es descargar el entorno de desarrollo y los drivers del Arduino, que se pueden bajar de la página <http://arduino.cc/es/Main/Software>.

Una vez descargado la caja de herramientas de ArduinoIO para MATLAB®, el cual hace falta para la adquisición de datos, se procede a instalarlo. Esto se realiza una sola vez, caso contrario si se tiene ya instalado aparece una advertencia que indica que no es recomendable hacerlo nuevamente.

A continuación, se presentan en la Tabla 2.5 los comandos: en las filas 1, para verificar si existe comunicación al intentar conectarse con la tarjeta y para la adquisición de datos los comandos de las filas 2 y 3, respectivamente, para conocer el puerto por el que va leer la tarjeta Arduino MEGA, de mucha utilidad ya que se tiene 15 entradas analógicas.

Tabla 2.5 Algunas de las primeras instrucciones, que el estudiante debe tener instalada también en su PC, para realizar las prácticas de autoevaluación.

INSTRUCCIÓN	DESCRIPCIÓN
ar = arduino (´puerto donde se da la comunicación COM----´)	Permitir verificar si existe comunicación, esto se logra generando una variable con la siguiente instrucción de la columna de la izquierda.
ar.analogRead (del 1---15)	Se debe recordar que el conversor analógico/digital es de 10 bits, lo que indica que se va a tener $2^{10} - 1 = 1023$ valores, cuyo valor inicial es cero y su valor máximo es 1023, la cuantificación que tiene Arduino es de 0 V para 0 y de 5 V para 1023
Luego para tener el valor en voltaje se puede utilizar la siguiente instrucción:	
dat= ar.analogRead (del 1---15)* 5/1023	Este es el nivel de tensión, que debe ser interpretado para saber su valor en kilogramos (kg). Algunos de los programas usados para el control del motor PAP, se puede apreciar en el Anexo G.1.2.

Fuente: Autor.

Como interactúa MATLAB®/Simulink y Arduino se muestra en la Figura 2.11, aquí a la izquierda se muestra el sistema de adquisición de datos con MATLAB®/Simulink y a la derecha el esquema de potencia instalado para el motor PAP.

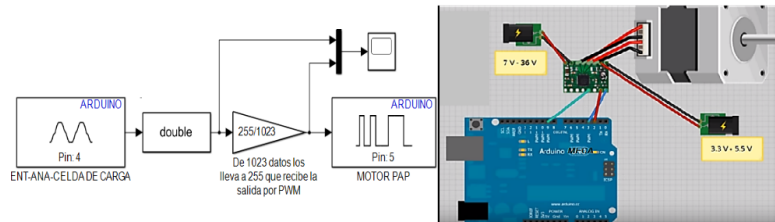


Figura 2.11 Diagrama de bloques para la adquisición de datos con MATLAB®(izquierda), esquema de instalación de potencia del motor PAP (derecha), Fuente: Autor.

2.6 Diseño del Servomecanismo y del controlador

En la presente investigación es necesario el diseño de un sistema de transmisión mecánica, debido principalmente a las condiciones propias del tamaño de la máquina, que no dispone de suficiente espacio.

Por tanto, no es posible realizar el acople directo entre el motor paso a paso y el eje del tornillo, por lo cual surge la necesidad de un sistema alternativo para transmitir la fuerza que emite el motor paso a paso.

Existen diferentes dispositivos mecánicos que permiten este fin y que cumplen con las características más relevantes como son: Construcción y montaje, costos, eficiencia, mantenimiento, vida útil. A todo lo anterior se le debe añadir, que en este proyecto la transmisión es en longitudes pequeñas y a bajas revoluciones, esto también tendrá mucha influencia al momento de seleccionar el servomecanismo, que permita el control del cierre de las placas de la trituradora.

Seguidamente, se procede a seleccionar el método que mejor se adapta en este trabajo, para ello se procede a designar mediante pesos, la importancia de cada uno de los indicadores en una escala de 0-1. En la Tabla 2.6 se indica dicha información.

Los pesos asignados a cada característica están en función de la disponibilidad de recursos (materia prima) y de las condiciones propias de la máquina, es así que a la característica construcción y montaje se le ha dado un peso mayor que al resto, ya que de esto depende la cantidad de elementos adicionales que se necesitan implementar a la máquina, para poner en acción la alternativa expuesta.

Por ejemplo, el sistema de poleas requiere de un dispositivo para tensar la banda, en caso contrario, la eficiencia disminuirá, en contra posición a los sistemas de engranaje o rueda de ginebra que no requieren de este dispositivo, el resto de los pesos asignados dependen en gran parte de la primera característica, por lo cual se les ha asignado un rango menor.

La característica costos es la que se ha considerado la segunda más importante, ya que de esto dependerá la inversión para la aplicación del presente proyecto y así mismo los costos serán mayores a medida que se necesite mayor cantidad de elementos para su montaje.

En esta misma tabla se indican adicionalmente los valores asignados para cada alternativa de acuerdo al indicador, éstos están delimitados en una escala de 0-10, donde 10 representa “*lo mejor*” mientras que cero representa “*lo peor*”. Cada dato numérico está basado en las características señaladas anteriormente.

Tabla 2.6 Tabla de decisión multicriterio para seleccionar el método de transmisión mecánica.

		Indicadores					
		Construcción y Montaje.	Costos	Eficiencia	Mantenimiento	Vida Útil	Valor Final
		(0,4)	(0,3)	(0,1)	(0,1)	(0,1)	
Alternativa	Transmisión por:						
	Polea	4	4	2	10	1	4,1
	Engranaje	10	7	10	5	10	8,6
	Cadena	4	4	10	5	10	5,3
	Rueda de Ginebra	8	6	10	5	8	7,3

Fuente: Autor.

El servomecanismo Rueda de Ginebra con un valor de 7,3 es la segunda mejor opción después del sistema de engranajes. La diferencia con respecto a este tipo radica en el tiempo de construcción de las ruedas que tienen un nivel mucho menos complejo que la De engranajes. Los valores finales de la Tabla 2.6, se obtienen, sumando los cinco indicadores y dividiéndolos por cinco. El mecanismo rueda de Ginebra se compone de la rueda conductora, en el mismo eje de esta rueda se acopla el eje del motor paso a paso, mientras que en la rueda conducida se acopla el tornillo ajustable (Shighley, 2001). La

rueda conductora dispone de un pivote que al girar hace tope con una de las 4 ranuras que tiene la rueda conducida; en este caso por cada vuelta completa de la rueda conductora, la rueda conducida girará $\frac{1}{4}$ de vuelta es decir 90° .

En este proyecto es necesario que el tornillo ajustable gire media vuelta, por tanto, se requiere que la conductora gire 2 vueltas con lo cual completará 180° en la rueda conducida. De acuerdo al valor final obtenido en la Tabla 2.6, la mejor opción es utilizar el sistema de engranajes con un puntaje de 8,6, lo cual se corresponde con las condiciones de la máquina. El sistema de engranajes no requiere de mucho espacio, así también su construcción es más rápida con referencia a los otros sistemas, tiene muy buena eficiencia y se prolonga su vida útil con un adecuado mantenimiento que es la lubricación de los dientes. Debido al valor obtenido se selecciona para esta servotransmisión el sistema de engranajes.

A continuación, se procede a diseñar las dimensiones de las ruedas dentadas que componen el engranaje (Larburu, 2008). Para el cálculo del número de dientes de la rueda conductora (engranaje), se debe cumplir con la ecuación (5).

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (5)$$

Donde: i es la relación de transmisión, Z_1 es el número de dientes de la rueda conductora, Z_2 es el número de dientes de la rueda conducida, n_1 son las revoluciones por minuto de la rueda conductora, n_2 son las revoluciones por minuto de la rueda conducida.

En el presente trabajo el tornillo ajustable necesita al girar media vuelta (n_2), para lo cual en el mismo eje del tornillo se montará la rueda conducida (Z_2) (piñón), que se diseña con 10 dientes, mientras que la rueda conductora en consecuencia se

diseña con 1 vuelta (n_1), quedando como se muestra a continuación el cálculo de los dientes de la rueda conductora: $Z_2=10$; $n_1=1$; $n_2=1/2$; $Z_1/10=1/0.5$; $Z_1=20$ dientes, valores que son reemplazados en la ecuación (5), para encontrar la relación de transmisión, tal como se presenta, en el siguiente cálculo.

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{20 \text{ dientes}}{10 \text{ dientes}} = \frac{1 \frac{\text{rev}}{\text{min}}}{0,5 \frac{\text{rev}}{\text{min}}} = 2$$

Adicionalmente para la construcción de las ruedas es necesario definir el módulo de $m = 3,5$. El valor de m se fija mediante el cálculo de resistencia de materiales, en virtud de la potencia transmitida y en función de la relación de transmisión que se establezca.

Con los valores adoptados se procede a modelar el sistema de engranaje y Rueda de Ginebra, utilizando un programa de diseño SolidWorks, el resultado se indica en la Figura 2.12.



Figura 2.12 a) Montaje de la Rueda de Ginebra, b) Sistema de Rueda Conducida y Conducadora y c) Motor PAP y tambor derecho, finalmente se construyó y empleo para este trabajo la Rueda de Ginebra, Fuente: Autor.

2.6.1 Implementación del sistema de control

Una vez obtenidos los resultados de las mediciones de los sensores a lazo abierto del proceso, se procede a conectar todos estos materiales, de tal manera de cerrar el lazo de control, tal como se ve en la Figura 2.13.



Figura 2.13 Diagrama funcional de la instrumentación utilizada en el proceso de trituración objeto de estudio, que incluye el motor PAP, Fuente: Autor

2.7 Grado de satisfacción de los alumnos en la utilización del MFC

El 79% de los alumnos estaban muy satisfechos (frente al 48% que estaban muy satisfechos cuando no usaban el MFC). El 21% de los alumnos están satisfechos (frente al 36% que estaban satisfechos en la aplicación estática). El 0% de los alumnos están poco satisfechos (frente al 16% que estaban poco satisfechos en la aplicación estática).

En cuanto a la opinión de los profesores, en principio necesitaron orientaciones metodológicas para su aplicación en clase; pero finalmente vieron las ventajas de la utilización del MFC en el aula porque realmente ayuda en la docencia: los alumnos en términos generales necesitan menos ayuda del profesor y éste tiene más tiempo para hacer una atención más personalizada de los alumnos (sobre todo aquellos que tienen dificultades) y evaluar más exhaustivamente, etc.

En el uso de estas aplicaciones en la docencia con alumnos se ha recogido datos informales por observación de parte del profesor investigador. Los estudiantes del primer grupo (los que sólo utilizaron el laboratorio virtual y/o remoto) parecen muy entusiasmados cuando ellos hablan de cómo realizar las actividades propuestas en los laboratorios virtuales. Durante su interacción con los laboratorios virtuales, parecen muy absorbidos e interesados en la tarea y con altos niveles de esfuerzo para conseguir la terminación de la tarea.

Los estudiantes del segundo grupo (los que no utilizaron la plataforma del laboratorio virtual y/o remoto) también mostraron buena voluntad e interés en el uso de la presentación educacional guiada por el profesor y menos implicados en la interacción con el material de aprendizaje y en la respuesta de cuestiones. En esta evaluación se ve de forma evidente como la interactividad mejora (ésta es superior en la utilización de laboratorios virtuales frente al no uso de este tipo de laboratorios).

Se ha partido de dos grupos que tenían similar conocimiento inicial de tecnología básica uno de ellos sólo ha utilizado el laboratorio virtual y el otro no. Se ha presentado los resultados de la evaluación (posterior al uso de dichas aplicaciones) mediante distintos gráficos, con una selección de datos de interés y se han analizado. Como conclusión de este análisis, se puede decir que la educación (en niveles de pre grado en el área de control automático avanzado y clásico aplicado a procesos de trituración y de destilación binaria) mediante Laboratorios Virtuales motiva más a los alumnos para realizar el trabajo propuesto. Además, de poder interactuar con docentes de las diferentes universidades que conforman el MFC. (Cerezo, F., & Sastrón, 2015).

2.7.1 Estudio estadístico aplicado a las prácticas de Trituración y de Columnas de Destilación Binaria (CDB)

La problemática planteada al inicio y que fue la ausencia de un centro de entrenamiento virtual y/o remoto en temas de minería e instalaciones de petróleo en la UNL que por la complejidad de dichos procesos permita simular y aplicar algoritmos de control, apoyados en el uso de herramientas de software matemático, como, por ejemplo, MATLAB® para el tiempo simulado o virtual, y de prototipos para el tiempo real y/o remoto. Se soluciona con los resultados obtenidos al aplicar un estudio estadístico al MFC, que se detalla a continuación.

2.7.2 Muestreo del estudio estadístico aplicado al MFC

Una vez que se implementaron los módulos de la plataforma de laboratorios virtuales y/o remotos, se desarrollaron encuestas, basadas en cuestionarios que contemplaron los siguientes aspectos:

- Resultados de calificaciones de los últimos cuatro años, divididos así, dos sin y dos con el uso de la plataforma de laboratorios virtuales y/o remotos.
- Sílabo aprobado hace tres años por la Facultad de Ingeniería Electromecánica.
- ¿Cómo mejorar la enseñanza-aprendizaje de CA (Control Automático)?
- Conocer cuáles de los participantes mejoraron con el empleo de la plataforma de laboratorios virtuales y/o remotos?
- ¿Cómo solucionar problemas relacionados con el control automático de los procesos de trituración en la minería y en instalaciones de petróleo, entre los que se estudian están el modelamiento matemático, implementación de estrategias de control clásicas y

avanzadas, uso de instrumentación y equipos, entre otros?

2.7.3 Registros de calificaciones en un período de cuatro años

Los beneficios que alcanzaron los estudiantes al realizar las prácticas CA. en el Laboratorio Virtual (LV) y/o de la UNL, es evaluado en temas de: teoría de control, estrategias de control clásico e inteligente, instrumentación aplicada e identificación o modelamiento matemático, entre otros. Dicha evaluación analizó estadísticamente las calificaciones obtenidas durante 8 ciclos desde septiembre 2014-agosto 2018 de 193 estudiantes de la materia de CA, cantidad que no incluye estudiantes que perdieron la materia o se retiraron, ya que no consiguieron llegar a la nota mínima para aprobar que es de 7, calificaciones que reposan en los archivos de la CIE (Carrera de Ingeniería Electromecánica).

Los 8 ciclos se dividieron en 2 grupos (2 años utilizando el LV, es decir, septiembre 2014-agosto 2016 y 2 años sin utilizar el LV, es decir, septiembre 2016- agosto 2018), valorando solo las calificaciones de 7 a 10, valores que necesitan los estudiantes para aprobar cada materia. La tendencia de estos promedios obtenidos se los muestra en la Figura 2.14.

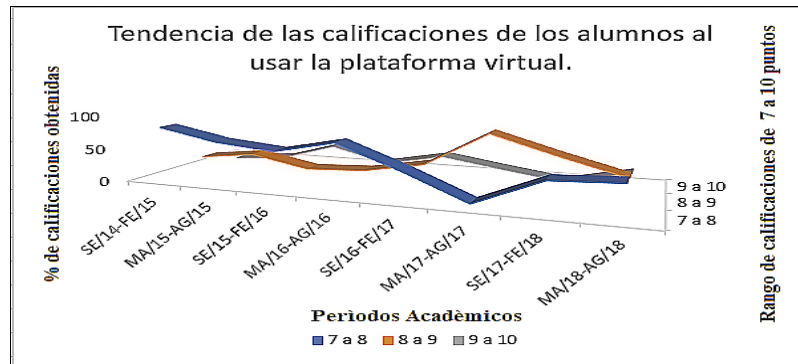


Figura 2.14 Resultados académicos obtenidos por los estudiantes de CA, en los períodos septiembre 2014-agosto 2018, Fuente: Secretaría de la CIE.

2.7.4 Validación de los resultados obtenidos

El estudio observacional que se utilizó es llamado encuesta y la técnica o instrumento de medición que permitió la recolección de datos son los cuestionarios, a esta encuesta se la denomina también exhaustiva por ser aplicada al 100% de la población, que en este caso son los estudiantes que cursan la materia de CA de la UNL. Además, por esta misma razón se puede afirmar que el nivel de confianza de este estudio descriptivo, tiene un nivel de confianza bastante alto. De esta manera los cuestionarios aplicados generaron un historial de calificaciones en los últimos cuatro años, divididos en dos haciendo uso y no, de la plataforma de laboratorios virtuales y/o remotos, implementada en la UNL.

Dichos cuestionarios plantearon en su momento la siguiente pregunta de investigación:

¿Existen diferencias significativas cuando utilizan las estudiantes la plataforma virtual y/o remota implementada en la UNL para la enseñanza-aprendizaje de estrategias de control avanzadas y clásicas, en procesos mineros de trituración y de la destilación en instalaciones de petróleo?

La diferencia numérica es evidente antes y después de usar la plataforma virtual, pero esto por sí solo no es suficiente para tomar una decisión, ya que debe haber una diferencia probabilística que lo justifique, una forma muy sencilla de hacerlo es el test de Chi-cuadrado de independencia, mismo que fue aplicado a los valores encontrados de la Tabla 2.7 llamada de contingencia extendida

Tabla 2.7 De contingencia extendida.

	<i>Rango de Calificación de:</i> 7-8	<i>Rango de Calificación de:</i> 8-9	<i>Rango de Calificación de:</i> 9-10	TOTAL
ANTES DE USAR LA PLATAFORMA DE LABORATORIOS VIRTUALES Y/O REMOTOS	63 67,74%	23 24,73%	7 7,52%	93 100%
DESPUÉS DE USAR LA PLATAFORMA DE LABORATORIOS VIRTUALES Y/O REMOTOS	39 35,45%	53 48,18%	18 16,36%	110 100%
TOTAL	102	76	25	203

Fuente: Autor.

2.7.4.1 Interpretación de los datos obtenidos del estudio estadístico

Para tabular los resultados obtenidos al usar los cuestionarios estructurados desarrollados para las diferentes prácticas que se encuentran en la plataforma del MFC, se procedió a definir los siguientes aspectos:

Variables analíticas: Enseñanza-aprendizaje de estrategias de Control Avanzado y clásico a los procesos de trituración de cobre y de la destilación binaria en instalaciones de petróleo; *Unidades de estudio:* Estudiantes que cursan la materia de CA; *Delimitación espacial:* Ciudad de Loja, UNL, y realizada vía Internet; *Delimitación Temporal:* septiembre de 2014/ septiembre de 2018.

Se definió el factor de confiabilidad, como criterio para ver si la variable: Enseñanza-aprendizaje de estrategias de Control Avanzado y clásico a los procesos de trituración de cobre y de la destilación binaria en instalaciones de petróleo, e independiente, del uso del laboratorio virtual y/o remoto de la UNL. Para esto es importante definir el nivel de significancia, el cual autoriza el valor del error que se puede cometer rechazando la hipótesis nula. Y que se lo contemplo para este caso es de 0,01 o lo que es lo mismo del 1%.

Formulación de hipótesis: Manifiesta que la masa de conocimiento hallado es suficiente y está bien distribuido, descartando que lo que se ha demostrado es irrelevante, en gran parte esto puede ocurrir por la gran cantidad de prácticas realizadas en comparación con los métodos tradicionales de enseñar CA. Existiendo una causalidad, es decir, hay una causa y efecto del uso del MFC, para mejorar la enseñanza de CA, que permite proponer las siguientes hipótesis:

Ho: Hipótesis nula, la enseñanza-aprendizaje de estrategias de Control Avanzado y clásico a los procesos de trituración de cobre y de la destilación binaria en instalaciones de petróleo,

no depende del uso de la plataforma de laboratorios virtuales y/o remotos, es decir, no tienen que ver nada una con la otra, son independientes. ***H1: Hipótesis Alternativa***, la enseñanza-aprendizaje de estrategias de Control Avanzado y clásico a los procesos de trituración de cobre y de la destilación binaria en instalaciones de petróleo, dependen del uso de la plataforma de laboratorios virtuales y/o remotos, es decir, tienen que ver nada una con la otra, están relacionadas entre sí, es decir, no son independientes.

Así, definidas las Hipótesis nulas y alternativas respectivamente, se procede a calcular la tabla de valores o frecuencias esperadas a cada celda de la Tabla 2.7, haciendo uso de la ecuación (6).

$$Fe = \frac{\text{Total de la columna} \times \text{Total de la Fila}}{\text{Suma Total}} \quad (6)$$

Una vez que se tiene estos valores se determina el Chi cuadrado aplicando la ecuación (7), para la sumatoria de todas las celdas

$$X^2 = \sum \frac{(Fo - Fe)^2}{Fe} \quad (7)$$

Obteniéndose la Tabla 2.8 que muestra los valores de contingencia extendida, de frecuencia esperada y el resultado del Chi Cuadrado averiguado, en la primera, segunda y tercera columna, respectivamente.

Tabla 2.8 Valores de contingencia extendida (F_o) y de frecuencia esperados (F_e), que permiten calcular el Chi Cuadrado (X^2) en la primera, segunda y tercera columna, respectivamente.

F_o	F_e	X^2
63	46,72	5,67
23	34,81	4,06
7	11,45	1,72
39	55,27	4,75
53	41,18	3,39
18	13,54	1,46
<i>TOTAL</i>		21,05

Fuente: Autor.

Al emplear la ecuación anterior se obtiene el siguiente valor 21,05, que se aprovecha para compararlo con el Chi cuadrado crítico, este último se lo encuentra aplicando la ecuación (8), encontrando de esta forma el número de grado de libertad.

$$NGL = (\text{Número de Filas} - 1) \times (\text{Número de Columnas} - 1) \quad (8)$$

Empleando la ecuación (9), se encontró que la variable Chi cuadrado va a tener 2 grados de libertad, por tanto, Chi cuadrado crítico, se halla haciendo uso de tablas que permiten conocer cuál es el valor para 2 grados de libertad y con 0,01 de nivel de significancia.

$$X^2_{crítico} = X^2(2); 0,01 \quad (9)$$

Lo que permitió hallar el valor crítico de 9,210, en tablas del Chi cuadrado.

Valoración o interpretación para la comprensión del fenómeno. El valor del Chi cuadrado calculado es mayor que el crítico ($21,05 > 9,210$). Por tal razón, se concluye que hay una relación entre la enseñanza-aprendizaje de estrategias de Control Avanzado y clásico a los procesos de trituración de cobre y de la destilación binaria en instalaciones de petróleo.

Además, el uso de la plataforma virtual y/o remota, redujo significativamente el número de estudiantes que perdían la materia de CA, en gran parte por la mayor cantidad de horas de prácticas que el estudiante de la UNL, puede realizar desde su casa, a más del valor agregado que da el pertenecer al MFC.

2.8 Conclusiones parciales

1. Se generó conocimiento en los estudiantes de la UNL al aplicar las estrategias de control clásicas y avanzadas para procesos de minería y de instalaciones de petróleo, con la implementación y uso de la plataforma de educación virtual y/o remota.
2. Se logró disminuir el tiempo de ejecución de los proyectos planteados y de interés para cada uno de los centros que conforman la red de educación virtual y/o remota, llamada MFC, porque hay mayor cantidad de gente involucrada en los mismos.
3. Se realizó con SolidWorks y Simulink® una animación en 3D que, permitió a los estudiantes usar el prototipo de trituración y los datos de una columna de destilación binaria de forma más eficiente, al aplicar las diferentes estrategias de control y a la vez utilizar los materiales y equipos en el laboratorio, tanto virtual como y/o remota.

4. Se empleó la arquitectura basada en comandos, para la práctica remota de la trituradora, permitiendo de esta forma que la dinámica lenta del proceso demore aproximadamente 2 minutos en preparar cada cambio de velocidad del motor PAP, banda transportadora y la zaranda, en lugar de 10 minutos, lo cual facilita más tiempo para que cada estudiante pueda probar otras estrategias de control con la ayuda de MATLAB®/Simulink.
5. Se elaboraron las prácticas de laboratorio siguiendo una taxonomía que se fundamenta en los sistemas de conocimiento, los sistemas de habilidades y el desarrollo de los medios didácticos. Cumpliendo así con los tres objetos de la trasposición didáctica y que son: el de saber, enseñar y enseñanza.
6. Se mostro mediante el valor cuadrado del Chi cuadrado que fue mayor que el crítico ($21,05 > 9,210$). Por tal razón, se puede garantizar que hay una relación entre la enseñanza-aprendizaje de estrategias de Control Avanzado y clásico a los procesos de trituración de cobre y de la destilación binaria en instalaciones de petróleo.
7. Se puede afirmar luego de una minuciosa búsqueda realizada en bases de datos indexadas, que el prototipo de proceso de molienda o trituración del cobre a escala de laboratorio virtual (LV), desarrollado en la UNL para uso didáctico, es un diseño con características únicas, ya que se les adicionó un tambor extra a los costados del mismo, lo que lo hace muy didáctico y fácil de controlar para los estudiantes.

CAPÍTULO III

SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO Y METODOLOGÍAS DE TRABAJO A EMPLEAR EN LAS PRÁCTICAS DEL LABORATORIO VIRTUAL

En este capítulo se muestran los resultados y metodologías que el estudiante va obtener cuando se usan herramientas y técnicas novedosas en la plataforma didáctica que se desarrolló y que se explicó en detalle en el capítulo anterior.

En esta plataforma los estudiantes tienen la posibilidad de tratar tres prácticas de laboratorio, dos de las cuales como se ha mencionado en capítulos anteriores son prototipos desarrollados por estudiantes de la UNL, y el otro es una columna de destilación, que se trata con datos reales para simular el comportamiento de algunos de los parámetros más relevantes del mismo y que fue parte de un proyecto para su construcción. En el caso del brazo robótico se presenta el control que se desarrolló con la ayuda de LabVIEW™, el cual permite controlar 4 servomotores y la implementación de esta práctica que se explica en detalle en el capítulo II, al ser parte de una de las primeras experiencias de LV que se desarrolló en la UNL.

Para el caso de la trituradora se emplearán entradas del tipo escalón y con una secuencia de valores en lazo abierto y lazo cerrado, con el fin de obtener los datos experimentales que permiten conseguir la función de transferencia de la trituradora. Para esto se usó la metodología CADCS e Ident, que posee el MATLAB®.

A continuación, se procederá a buscar que tipo de regulación es la que mejor resultado da en el control en tiempo real de la trituradora, tomando en cuenta tanto el aspecto técnico como el económico. Seguidamente, se implementa este tipo de control para realizar las pruebas de validación de los resultados obtenidos en el control en tiempo real de la trituradora.

Finalmente se sugiere revisar el Anexo E, donde se encuentra todo el desarrollo de la práctica de una columna de destilación binaria, usando para esto datos reales, los cuales fueron presentados en un evento IFAC, así el estudiante conocerá mejor este proceso y como aplicar estrategias de control avanzadas como son: LQR y Lógica Difusa.

Las prácticas anteriores brindan algunas ventajas a los estudiantes, que pertenecen a las universidades que conforman el MFC, entre estas ventajas está el uso por ejemplo de algunos de los siguientes equipos y programas:

1. Utilizar como modelo el equipo que se construyó usando como base uno existente de la firma Retch, que es un prototipo de trituradora a escala de laboratorio, al cual se le agregó un doble tambor y en la actualidad se encuentra patentado como modelo de utilidad.
2. Emplear los programas SolidWorks y Adams para el diseño mecánico y la construcción de los prototipos: de trituración a escala de laboratorio y de una columna de destilación por platos, desde hace aproximadamente dos años, como parte de un proyecto de la UNL. Esto ha permitido intercambiar experiencias en la construcción de modelos con la Universidad Politécnica Nacional y de la Universidad Católica de Chile.
3. Usar la metodología de las nuevas prácticas desarrolladas, lo cual permite a los estudiantes y personas que ocupan la plataforma del MFC, responder un cuestionario por una sola vez, cuyo contenido es

acerca del uso de la plataforma virtual y/o remota, y aprovechar las ventajas de Moodle.

4. Realizar las prácticas de forma virtual mediante la teoría representada por cuestionarios de conceptos básicos y más específicos de las estrategias de métodos de control, así como la simulación de los procesos de trituración de cobre y de la destilación de petróleo que se logran con la ayuda de MATLAB®. Esto ha permitido aplicar diferentes estrategias de control en varios ambientes simulados. Finalmente, se pueden acceder a la práctica remota en tiempo real, para ser realizada con datos reales. Por ejemplo, la identificación de procesos, las técnicas estadísticas aplicadas a datos y la prueba de diferentes algoritmos de control.

Una vez desarrollados los ambientes educativos sobre la plataforma, explicada en el capítulo II. Se cierra el lazo con el MATLAB® reforzándose de esta manera los conceptos de control automático en un ambiente conocido por los estudiantes, para procesos fuera de línea (tiempo simulado), como es la columna de destilación. Además, utilizando las plantas reales se pueden comparar con los resultados obtenidos, con los prototipos del brazo robótico (*que es un aporte adicional de la metodología virtual y/o remota implementada en esta tesis*) y de la trituradora con las plantas reales.

El prototipo de la columna de destilación binaria fue parte de un proyecto aprobado en marzo del 2017 y que finalmente no se pudo concluir por el tema económico.

Otra ventaja que ofrece el MFC en la sede de la UNL, es que permite probar diferentes estrategias de control e incluso la programación en C de los controladores con todos los detalles que esto implica. Las plataformas de la trituradora y del brazo robótico fueron desarrolladas sobre las tarjetas de control Arduino y la SSC-32, pudiendo usarse un PLC si fuera

necesario. El control automático de la columna de destilación se desarrolló sobre MATLAB®/Simulink, en ambiente de simulación.

3.1 Sistema de control automático y metodología de trabajo para la práctica de trituración

En la identificación de este proceso se presentan variables intermedias y variables principales de control, las que se presentan una a continuación de la otra, razón por la cual se establece que el proceso va ser controlado en cascada, donde el torque no juega un papel importante por ser una variable intermedia y no independiente, pero sí existe es una relación linealmente proporcional entre el torque y la posición. Seguidamente, se parte de un modelo de caja negra, con una sola entrada, una sola salida y dos perturbaciones como se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Variables involucradas en este proceso.

MODELO DE LA TRITURADORA	
Variables de entrada	Variables de salida
Posición (Rad)	Peso (kg)
Perturbaciones	
Peso de la carga (kg), modifica la Velocidad de rotación del motor (m/s)	
Material que se riega, es 1% del total del material utilizado (kg)	

Fuente: Autor.

Una vez que se conoce cuáles son las variables de entrada y salida se usa una señal tipo escalón. La variable de entrada que será llamada *posición* en radianes, es representada por la apertura y cierre de las mandíbulas (o placas de la trituradora). El volumen del material triturado que se requiere a la salida, se obtiene con el cierre de estas placas, debido al movimiento de un perno regulador. La variable de salida representada por el material triturado es el *peso* y será medido con una celda de carga. Para el análisis de la calidad de la señal en el dominio de las frecuencias, se tomaron 1 024 datos ($2^{10}= 1 024$) y se aplicó la transformada rápida de Fourier.

3.1.1 Diseño y ejecución de experimentos preliminares para la identificación

(Fernández, 2012), plantea que “Los experimentos preliminares se realizan con el fin de caracterizar las variables del sistema y obtener información del proceso tales como: la ganancia del sistema, el retardo, el posible orden y la menor constante de tiempo, donde toda esta información es necesaria para el diseño apropiado del experimento de identificación. El modelo que se obtenga va a ser utilizado para el control, por lo que la señal de entrada debe tener un valor lo más cercano posible al estado de operación”.

Lo expuesto anteriormente son acciones típicas de control de procesos, pero que habilitan a aplicar un programa de identificación como es el Asistente para el Diseño de Sistemas de Control Computer Aided Design and Control Systems (CADCS) que posee MATLAB®, y que se desarrolla sobre un estudio estadístico del proceso.

Así el usuario de esta plataforma puede unir la teoría, la simulación y la práctica en el momento de hallar el modelo matemático de la trituradora, ya que esto no se consigue con la

herramienta Ident de MATLAB®. Para mayor información se recomienda considerar (Benavides, L., & Pozo, 2015).

Los experimentos fueron realizados en el laboratorio de automatización de la Universidad Nacional de Loja, donde el ambiente de trabajo está libre de ruidos y existe una adecuada temperatura ambiente. El prototipo a escala laboratorio que se construyó para estos fines permite simular el proceso de trituración de una forma muy segura.

A continuación, en la Tabla 3.2 se indica una muestra representativa de los diferentes datos hallados experimentalmente a lazo abierto y que serán posteriormente utilizados para la identificación de la trituradora.

Tabla 3. 2 Muestra de los valores más significativos de los resultados hallados experimentalmente.

Ángulo en radianes (Rad)	Voltaje (salida de tarjeta DAQ), señal que se entrega al servomecanismo	Peso en la Entrada (tritadora) (kg)	Peso en la salida (Zaranda) (kg)	Diferencia de peso material (entr/sali) (kg)	Torque τ (N·m)	Longitud de la punta del perno regulador (m), cuando se está apretando
0	0	2	1,25	0,75	2,706	7×10^{-4}
π	29,9	2	1,36	0,64	4,671	8×10^{-4}
2π	28,1	2	1,42	0,58	5,428	$9,3 \times 10^{-4}$
3π	27,9	2	1,38	0,61	6,285	$10,2 \times 10^{-4}$
3π , se repite por la dureza de la piedra	28,7	2	1,52	0,48	6,285	$10,2 \times 10^{-4}$

Fuente: Autor.

3.1.2 Diseño de los experimentos de identificación

El tiempo total que dura cada experimento es de 22 segundos incluido el retardo en el tiempo de la banda transportadora.

Seguidamente con la ayuda del MATLAB® se realiza el análisis en el dominio del tiempo para saber si los datos obtenidos, fueron alcanzados con un correcto tiempo de muestreo, además de ratificar la presencia de retardo.

3.1.3 Análisis de datos en el dominio del tiempo, haciendo uso de la herramienta CADCS

A continuación, se presenta una metodología usada en los CADCS, destacándose de las otras herramientas como Ident de MATLAB®, por usar la estadística para realizar el diseño del sistema de control. Algunos resultados del uso de esta herramienta se muestran en Anexo H.

3.1.4 Análisis de la auto-correlación.

Para el análisis se realizó la auto-correlación de la variable de salida, que permite conocer la cantidad de información que se pierde al digitalizar la señal con el periodo de muestreo seleccionado.

Un dato práctico para decidir si son válidos los datos obtenidos, es que el segundo "pico" o valor, sea igual o mayor a 0,85, esto se puede observar en la Tabla H.1 del Anexo H. Un valor inferior indicaría la pérdida de información en las mediciones tomadas, si este criterio se cumple entonces es válido afirmar que se ha tomado un periodo de muestro apropiado.

A continuación, se muestra la manera que se empleó la función autocorr con el asistente matemático de MATLAB® (Sierra, 2012).

Los datos son representados en la Figura 3.1 utilizando para esto la función: autocorr (PESO2), en donde se puede apreciar que, con un intervalo de muestreo definido, es posible recoger la información necesaria del proceso, para estudiar su comportamiento dinámico.

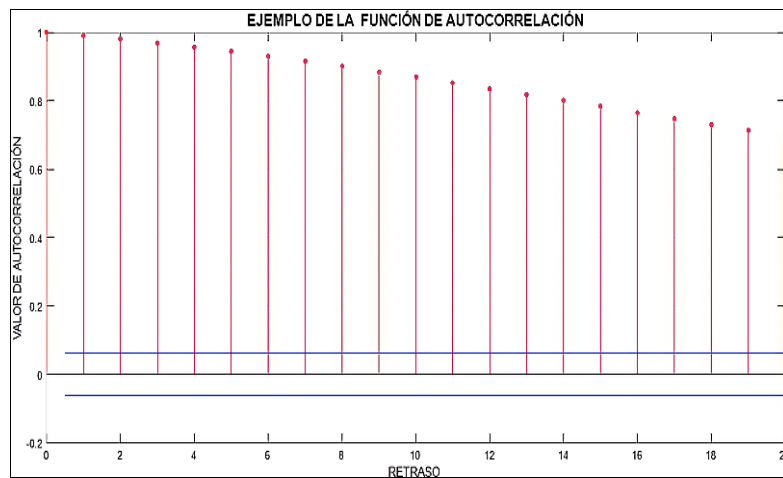


Figura 3. 1 Auto-correlación de la salida, Fuente: Autor.

[acf lags]= autocorr (PESO2), se hace uso de esta instrucción:

Donde el PESO2 es la salida de la trituradora, acf es el vector que contiene las muestras de auto-correlación y lags es el vector que contiene los retardos. Por defecto MATLAB® establece que son 20 pasos de retardo, pero esta cifra puede modificarse (Sierra, 2012).

3.1.5 Análisis de la correlación cruzada

El análisis estadístico de la correlación cruzada permite conocer si el proceso presenta retardo de tiempo, para esto se procede a estudiar la relación entre las variables, conocer el grado de efecto de una sobre la otra y el tiempo que demora en aparecer dicho efecto (Delgado, L., Fernández, L., & Vargas,

2011). Seguidamente se muestra la forma como se empleó la función `crosscorr`, con el asistente matemático MATLAB®.

[`xcf lags`]= `crosscorr` (`POSI`, `PESO2`), se hace uso de esta instrucción:

Donde `PESO2` sigue siendo la salida de la trituradora, `POSI` es el vector de entrada, `xcf` es la denominación para encontrar la correlación cruzada, el anterior criterio permite encontrar la autocorrelación y `lags` es el vector que contiene los retardos (Sierra, 2012).

El tiempo de muestreo (T_s) es de 0,000976 segundos con una resolución de 2^{10} , que es igual a 1 024 datos que se obtienen en un 1 segundo. Si a esto se considera que se obtuvieron datos durante 22 segundos, hasta obtener una gráfica que se estabilizó. En total Se adquirieron alrededor de 22 528 datos.

Seguidamente, se realizó un proceso de interpolación de los 22 528 datos, es decir, por cada 88 datos se interpoló a 1 (1/88 del T_s), con lo que se obtuvo una cantidad suficiente de información del comportamiento del proceso, hasta su procesamiento posterior, tal como lo recomienda (Vargas, G., & Fernández, 2011). Además, se renombraron las variables como: `PESO2` al peso del material triturado y `POSI` a la posición de cierre de las placas de la trituradora tipo mandíbula.

La correlación cruzada se puede observar en la Figura 3.2, donde la correlación es más fuerte se encuentra en el instante 16,9 y le corresponder un retraso con un valor de 0,219, que es la muestra de correlación representadas en el eje de las y se conoce el valor de $T_s = 0,000976$ seg, entonces el retardo (τ) se puede calcular como se indica en la ecuación (10).

$$\tau = T_s (\text{seg}) \times \text{Lag} \quad (10)$$

De la ecuación anterior se extrae que el proceso tiene retardo y que es de 16,9 y está formado por la suma del tiempo de la trituración, más el tiempo que se demora el material en recorrer la banda transportadora hasta que se logra medir, que es justamente el valor empleado en los experimentos.

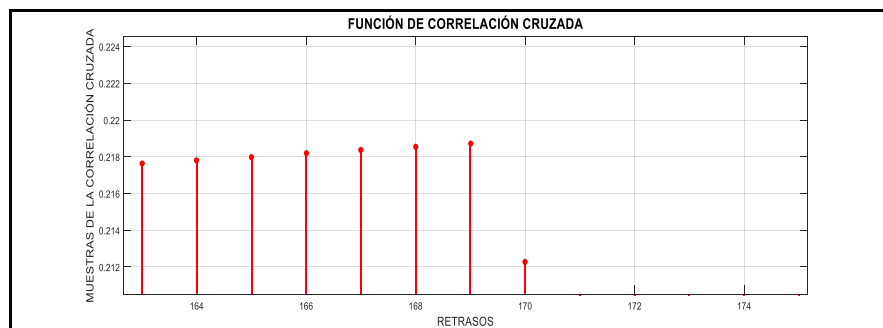


Figura 3. 2 Correlación cruzada de la entrada (posición) con respecto a la salida (peso), Fuente: Autor.

También se pudo encontrar el correcto tiempo de muestreo y que justifica la novedad de este método propuesto, en comparación con el retardo encontrado con la metodología Ident de MATLAB® y que es de 17,58 segundos, dando un error de 0,68 segundos del encontrado experimentalmente, el cálculo de este valor se lo puede apreciar en epígrafe 3.2.2 de Ident. A continuación, se procede a estimar el modelo matemático de la trituradora, haciendo uso de la herramienta CADCS.

3.2 Uso de la herramienta CADCS, para la identificación del sistema

Una vez que se realizó el análisis en el dominio del tiempo, se procede a identificar el modelo matemático de la trituradora, para lograr esto se empieza por cargar las variables de entrada y salida obtenidas experimentalmente, en el workspace de MATLAB®.

Cada experimento empleó 1 024 datos en un segundo, que equivale a 256 datos para cada posición (0 Rad, Π Rad, $3\Pi/2$ Rad, 2Π Rad), lo que concuerda al aplicar el criterio de los datos de Fourier 2^n , es decir 2^{10} . EL programa completo para el cálculo de este modelo se encuentra en el Anexo I.1.

3.2.1 Aplicación del escalamiento de los datos empleados en el experimento, con la finalidad de reducir el error.

Para reducir el error se hace uso de los siguientes comandos:

$p = \text{polyfit}(X, Y, 3)$, esta función entrega los coeficientes de un polinomio $p(x)$ de grado n , a través del ajuste por el método de mínimos cuadrados para los datos en Y , donde X es la salida del Peso, la Y es la entrada o Posición y n viene a ser el grado del polinomio con el que se realiza el ajuste, definiendo por X , Y a los datos de entrada y salida. Los datos de salida obtenidos con la función `dataprev` se muestran en la Figura 3.3.

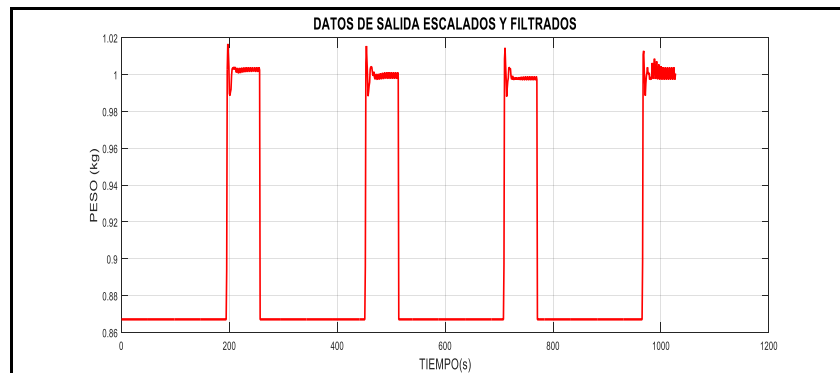


Figura 3.3 Uso de la función `dataprev`, Fuente: Autor.

Al utilizar la función `dataprev`, se obtienen los datos estadísticos de la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Datos estadísticos obtenidos escalando los datos hallados experimentalmente.

Nombre Estadístico	Dato Estadístico	Nombre Estadístico	Dato Estadístico
Promedio Entrada	0,98594	Promedio Salida	0,89883
Desv.Est.Entrada	0,039883	Desv.Est. Salida	0,056671
Mínimo Entrada	0,86712	Mínimo Salida	0,86712
Máximo Entrada	0,99931	Máximo Salida	1,0167
Máxima Correlación	0,99768	Número de pasos para la máxima correlación	0

Fuente: Autor.

Se mejora notablemente la auto-correlación de la entrada y de la salida, así como la correlación entre la entrada y la salida, lo que se puede apreciar en la Figura 3.4.

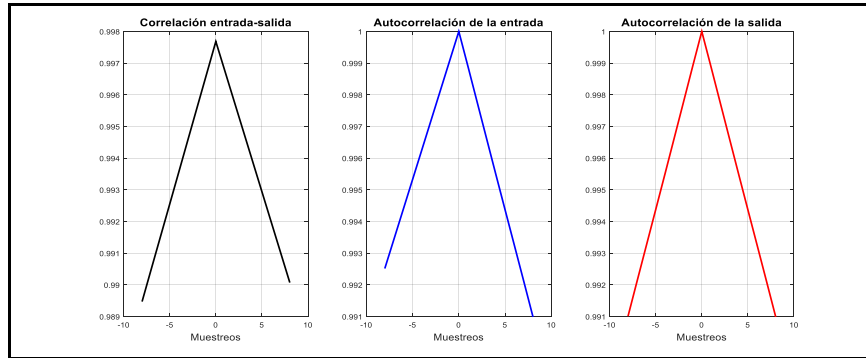


Figura 3.4 Gráficos del análisis de correlación. De izquierda a derecha a) Función de correlación cruzada entre la entrada y la salida; b) función de auto-correlación de la entrada; c) función de auto-correlación de la salida, Fuente: Autor.

Al hacer uso de la instrucción:

`[Num,Den,Fit,atm]=idstrejc(t, PESO2, np, stp);` para los datos obtenidos experimentalmente se obtiene la Figura 3.5.

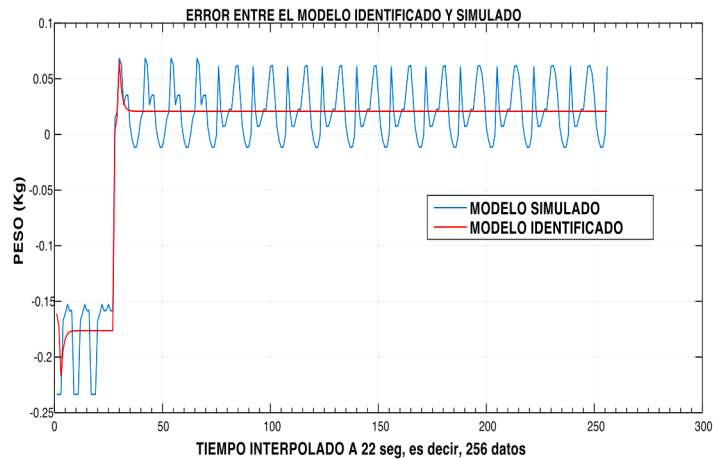


Figura 3.5 Error hallado entre los datos medidos y los simulados, Fuente: Autor.

3.2.2 Verificación del modelo matemático haciendo uso de la herramienta APPS (aplicaciones de MATLAB®)

Otra variante para encontrar el modelo matemático de la trituradora, es el uso de la herramienta APPS, que permite hallar un nuevo modelo y compararlo con el ya encontrado y de esta manera elegir el que mejor se comporte a los fines de control. A continuación, se explica cómo se debe usar esta herramienta.

Con la ayuda de los toolboxes de MATLAB®, se procede a cargar los datos hallados experimentalmente, para poder usar las herramientas de optimización. De manera que al enviar los datos al asistente para identificación `ident`, se minimiza el error entre las señales identificadas y los datos, lo que se conoce como reproductibilidad.

Seguidamente, con esta herramienta se obtienen los resultados en rojo, que se muestran en la parte de la izquierda de la Figura 3.6, y con azul la forma de la planta que se va usar para aplicar las distintas estrategias de control.

A continuación, los criterios que se tomaron en cuenta para selección del modelo:

- El método de minimización del error de predicción, Prediction Error Minimization, por sus siglas en inglés (PEM).
- El método conocido como Ajuste del Error de Predicción, Fit Prediction Error, por sus siglas en inglés (FPE). Permite conocer el error entre los datos identificados y el modelo simulado.

Lo cual da el modelo matemático deseado usando el PEM y así obtener el ajuste a la estimación de datos y el FPE, con un valor de 95,63% y 0,00047335, respectivamente. El modelo

matemático encontrado es de primer grado y con retardo que difiere muy poco del encontrado experimentalmente.

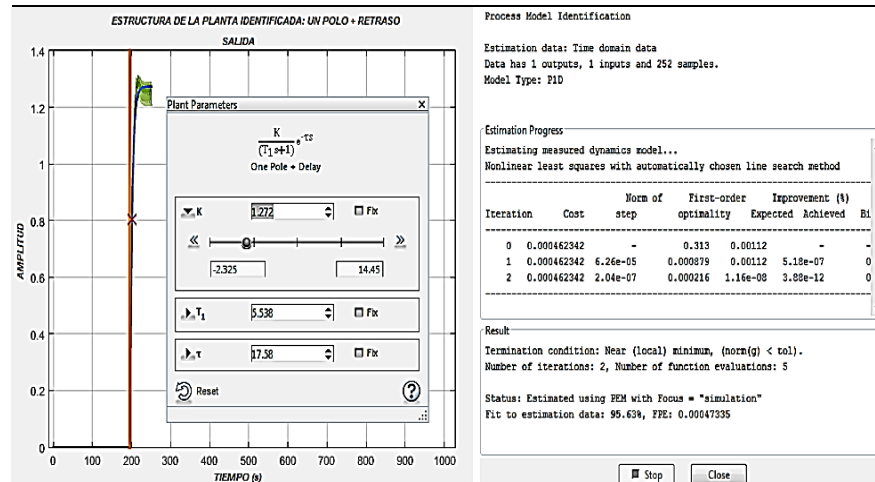


Figura 3.6 Resultados obtenidos con la herramienta APPS de MATLAB®, Fuente: Autor.

Posteriormente en la Tabla 3.4 se presentan los resultados hallados usando el software MATLAB® y diferentes tipos de acondicionamiento a los datos hallados experimentalmente. La metodología CADCS esta presente en esta tabla en la columna 2, aquí se puede apreciar que el error es muy grande ante la presencia de retardo, cuando se aplica una señal de entrada escalón, como es el caso de este proceso. Al aplicar la técnica: CADCS de MATLAB®, a los datos experimentales se puede notar que se logra corregir el error, pero no al valor del prototipo del proceso que es del 2,5%.

La herramienta APPS, logra minimizar el error de una forma considerable a un valor de 0,00047335, que esta dentro del rango permitido para prototipos.

Con la información obtenida anteriormente y sabiendo que la salida será estable para la entrada de 2kg, se puede ratificar que la salida después de un tiempo constante de 5,53 seg, es de 63,2% 2kg, o lo que es lo mismo 1,26 Kg y de 1,2725 kg, cuando al fin se linealiza, tal como se muestra en la ecuacion (11), que representa el modelo matemático de la trituradora.

$$TF = \frac{\text{Peso (kg)}}{\text{Posición (Rad)}} = \frac{1,2725 e^{-17,58s}}{5,53 s + 1} \quad (11)$$

Tabla 3. 4 Resultados obtenidos tras ejecutar dos métodos, como son: CADCS e Ident, respectivamente, para hallar el modelo matemático de la trituradora

	<i>CADCS-Datos Interpolados, filtrados y escalados (1 024)</i>	<i>Aplicando la herramienta APPS de MATLAB®</i>
Auto-correlación de entrada	1 alta	0
Auto-correlación de salida	1 alta	0
Correlación Cruzada	0,216 en el instante 169	0
Tiempo de retardo encontrado	16,9	17,58
Periodograma	Incluye una alta presencia de ruido	0

% del Error	0,00068121, durante toda la simulación, con una reproductibilidad de 70,23% de ajuste de estimación de datos	0,00047335, durante toda la simulación, con una reproductibilidad de 95,63% de ajuste de estimación de datos
Modelo Matemático Obtenido	$TF = \frac{Peso (kg)}{Posición (Rad)}$	$TF = \frac{Peso (kg)}{Posición (Rad)} = \frac{1,272}{5,5}$
Máxima correlación	0,99768 alta	0
Desviación Estándar de Entrada	0,039883	0
Desviación Estándar de Salida	0,056671	0
Mínimo Entrada	0,86712	0
Máximo Entrada	0,86712	0
Mínimo Salida	0,99931	0
Máximo Salida	1,0167	0

Fuente: Autor

El retardo del tiempo es de 17,58 segundos, porque en cualquier proceso en el que se presentan bandas transportadoras, poseen un tiempo desde que el material cae

en la banda hasta que es finalmente medido este tiempo. A continuación, se muestra el cálculo de las diferentes estrategias de control, que se probaron con el prototipo de trituración de cobre

3.3 Controlador PID

Este sistema de control consta de dos componentes: un motor PAP (motor paso a paso) y el modelo de la trituradora, donde la entrada del sistema es la posición del motor PAP. El sistema consta con dos reguladores PID, conectados en cascada, y los períodos de control de estos no son los mismos. El del motor es 10 veces menor que el periodo de control de la variable principal, que es el peso. El esquema para el control del peso a la salida de la trituradora se muestra en la Figura 3.7.

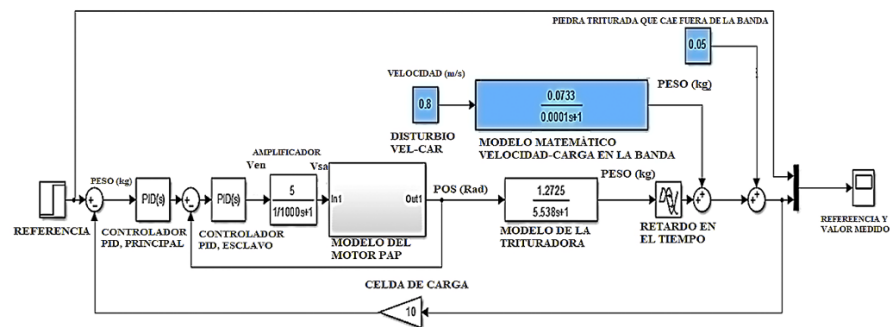


Figura 3.7 Modelo del control en cascada de posición y peso de la trituradora objeto de estudio, Fuente: Autor.

Los resultados de esta práctica se pueden mostrar en la Figura 3.8, al aplicar el software MATLAB® y la herramienta de control PID, respectivamente. La referencia, que en este caso es una señal escalón de 2 kilogramos, no es alcanzada por la salida, que está representada con el color azul, durante los 100 segundos que dura, la simulación.

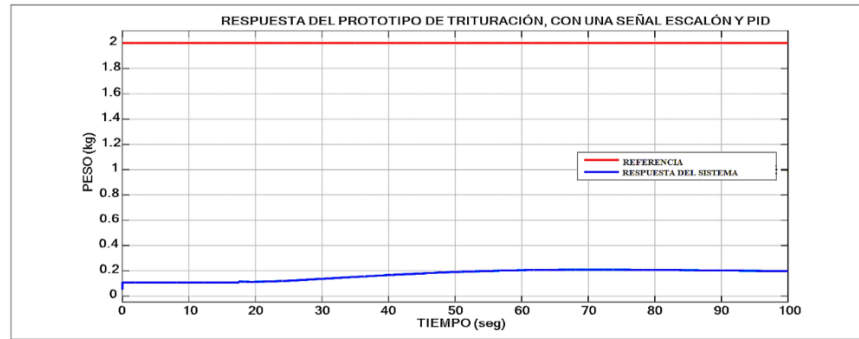


Figura 3. 8 Respuesta temporal del sistema de control del peso con la referencia, ante una entrada escalón y controlador PID, Fuente: Autor.

3.3.1 Controlador con Predictor de Smith

Este tipo de controlador, es muy usado para sistemas con gran presencia de retardo, es así que se propone el esquema de control de la Figura 3.9, que vendría a ser una variante del que se muestra en la Figura 3.7.

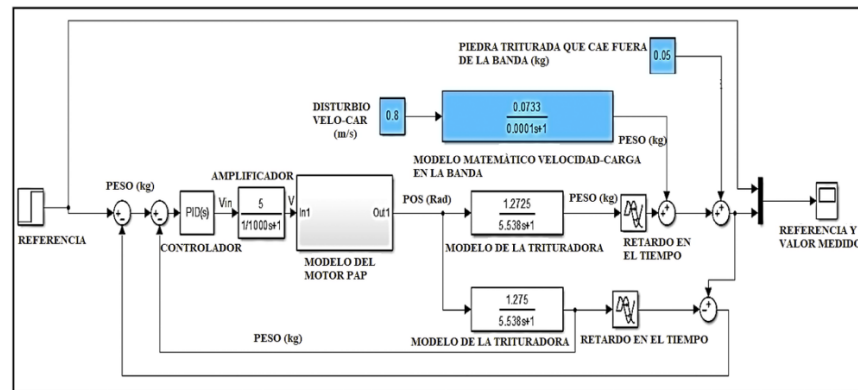


Figura 3.9 Diagrama de bloques aplicando el método de control Predictor de Smith, Fuente: Autor

Seguidamente se muestra en la Figura 3.10 el resultado al aplicar un Predictor de Smith, para una simulación de 100 segundos, donde con el color rojo se ve la referencia del sistema, que para este ejemplo es de 2 kg y con el color azul la respuesta en este intervalo de tiempo.

El resultado de simular el proceso anterior, muestra que se puede controlar y la respuesta del sistema alcanza a la referencia en 37 segundos.

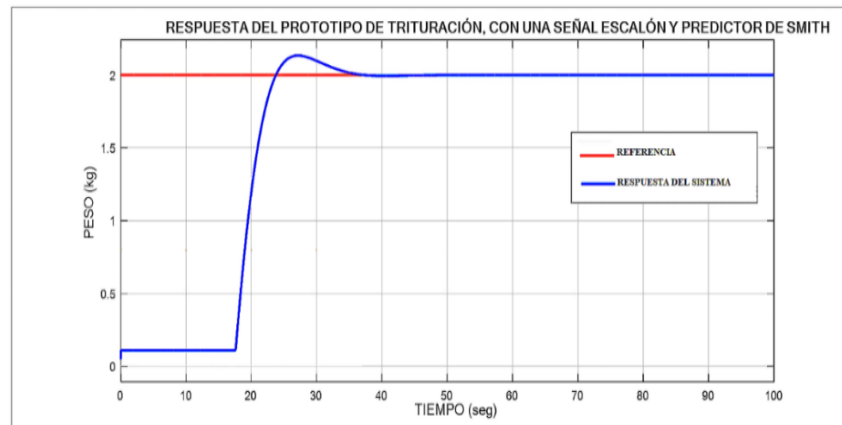


Figura 3. 10 Respuesta temporal del sistema y del modelo, con una señal escalón y un controlador Predictor de Smith. Fuente: Autor.

3.3.2 Controlador MPC (Modelo de Control Predictivo)

En este tipo de controlador la predicción de la salida de un proceso está basada en los perfiles de las señales de salida y entrada pasada. Es un método importante del control avanzado, para superar los problemas que existen en el control de sistemas multivariables (Seborg, D., & Duncan, 2004).

En el diagrama de bloques de la Figura 3.11, se indica el tipo de regulador aplicado al proceso, que se encarga de recibir en su entrada tres señales: la señal medida de la salida (M_o), referencia (ref) y los disturbios opcionales (M_d). Este controlador optimiza las variables manipuladas mediante la ejecución de un programa cuadrático. Este bloque pertenece a la librería del MATLAB®/Simulink y sirve para la simulación del proceso y generación de código.

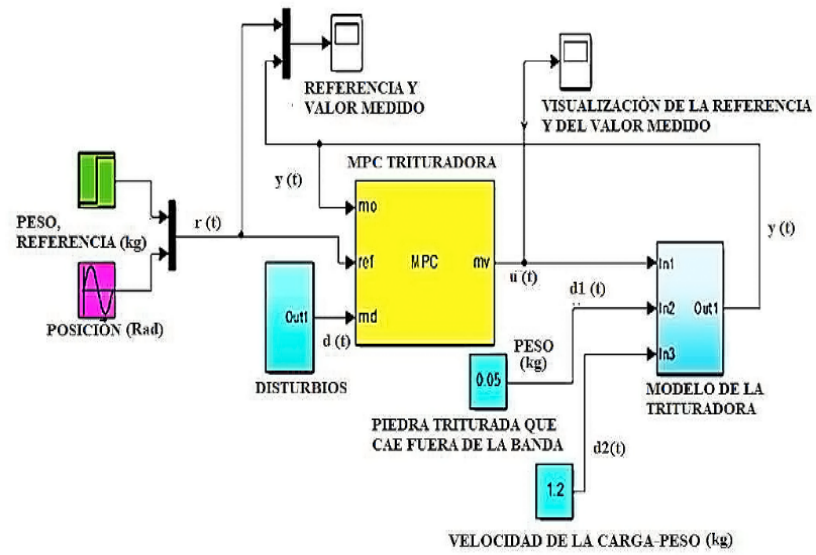


Figura 3.11 Regulador MPC., basado en QP, o programas cuadráticos, Fuente: Autor.

Inmediatamente, se presenta los detalles del modelo MPC en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Detalles del modelo MPC, aplicado a la trituradora.

Nombre	MPC
Tipo	Espacio de estado (ss)
Número de entradas	Son 3 y sus nombres son: MPC Trituradora, Disturbios (1) y Disturbios (2)
Número de salidas	Son 2 y sus nombres son: Modelo de la trituradora (1), Modelo de la trituradora (2)
Orden	Es de 5 ^{to} orden (Toma en cuenta todo el proceso con bandas, perturbaciones etc....)
Tiempo de muestreo discreto, en segundos	1
Máximo retardo de entrada y salida	Igual a 0 (Máxima Entrada/Salida de retardo igual a 0)

Fuente: Autor.

El resultado del modelo se puede evaluar más en detalle, al momento de realizar la simulación del proceso, tal como se muestra en la Figura 3.12, donde se puede ver el comportamiento de la variable peso en kilogramos (en la parte inferior), y la variable posición en radianes (en la parte superior), ambas con color azul y con color rojo la referencia para ambos gráficos, o sea, el peso 2 kg y la posición Π Rad, respectivamente

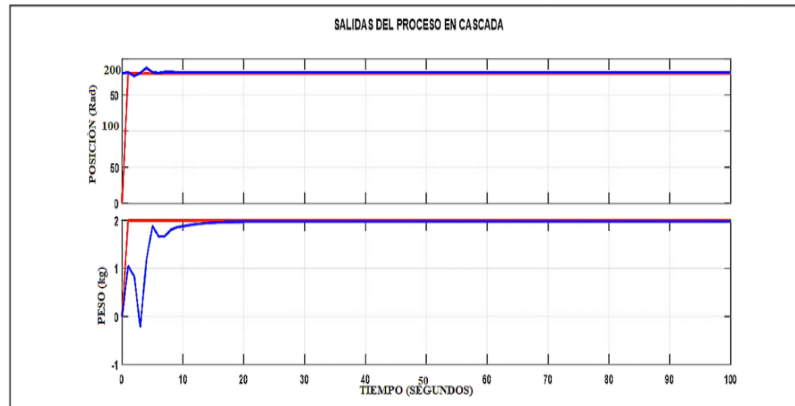


Figura 3. 12 Respuesta temporal del peso (kg) y posición en (Rad), cuando se emplea una señal de entrada escalón y se aplica un controlador predictivo (MPC), Fuente: Autor.

Aplicando una opción de avanzada de autoajuste y con una función de desempeño I.A.E. (*se adoptó como índice indicativo del mejor desempeño la integral del error absoluto*) y que se puede observar en la ecuación (12) (Gamalero, M., & Luppi, 2013).

$$IAE = \int_0^{\alpha} |e(t)| dt \quad (12)$$

Aunque se pueden usar otros criterios, si el error es menor a uno, como cuando la integral del error cuadrático es muy pequeña (Boyd, S., Ghaoui, E., Feron, E., & Balakrishnan, 2015).

En la Figura 3.13, se puede distinguir como mejora la respuesta del sistema cuando se aplica esta opción de avanzada de autoajuste. Está grafica consta de tres líneas, una de color azul (hallada antes de aplicar esta técnica y referente a mejorar), una línea de color verde (hallada aplicando el autoajuste) y finalmente otra con color rojo (el valor deseado o referencia).

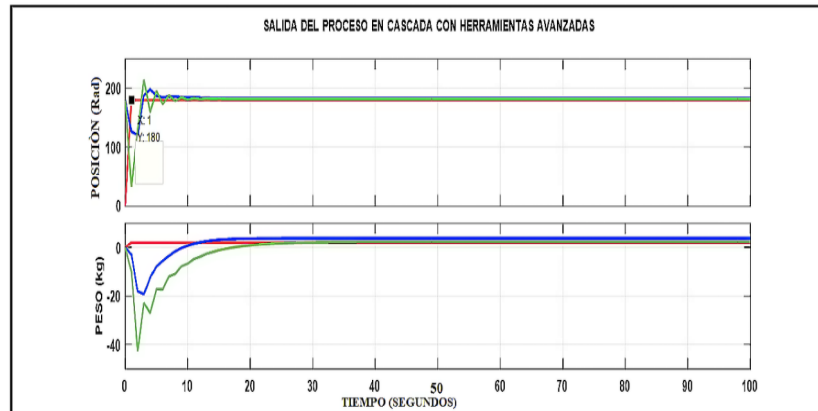


Figura 3. 13 Respuesta temporal del controlador MPC, ajustado con opciones avanzadas y la función de desempeño IAE, Fuente: Autor.

3.3.3 Controlador LQR (Regulador Lineal Cuadrático), aplicado al proceso de Trituración

Este controlador se aplica realizando un programa en MATLAB®, en donde la dinámica de la trituradora es representada por un sistema de 5^{to}. Orden, para luego ser llevado al espacio de estado y poder aplicar esta estrategia. A continuación, se señalan las matrices halladas, el programa completo se puede percibir en el Anexo I.2:

$$A = \begin{bmatrix} -1000 & 0 & 0 & 0 & 0; & 0 & -0.1806 & 0 & 0 & 1; \\ 4.16e08 & 0 & -3.256e04 & 1.91e04 & 0; & 2.292e-07 & 0 & 0.04584 & 0 & 0; \\ -1.05e-11 & 0; & 0 & 0 & 0 & 1 & 0; \end{bmatrix};$$

$$B = [1 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0.2298 \ 0 \ 0 \ 0]; \ D = [0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0];$$

Seguidamente, se calcula las matrices de índice desempeño cuadrático Q y R, que determinan la importancia del error y del costo de energía, hasta obtener una respuesta satisfactoria, a través de las ecuaciones 11 y 12, respectivamente. Los

elementos de la diagonal que conforman la matriz Q son valores de los estados (lo cual es fácil de señalar cuando se tiene el modelo del sistema). Esto indica que se debe tomar el valor máximo y mínimo *de las salidas de cada uno de los espacios intermedios*, para luego ser reemplazado en la ecuación (13).

$$Q = \frac{1}{[(Valor\ Máximo - Valor\ Mínimo)]^2} \quad (13)$$

De igual forma se calcula R, pero con la diferencia que los valores empleados son: *las entradas de cada uno de los espacios intermedios*, para luego ser reemplazados en la ecuación (14). Esto se logra simulando el sistema de bloques de la Figura 3.14 y así se toman los valores máximo y mínimo de cada espacio intermedio, además se verifico los valores encontrados, con la posición de cada elemento en el prototipo de la trituradora.

$$R = \frac{1}{[(Valor\ Máximo - Valor\ Mínimo)]^2} \quad (14)$$

Con los valores hallados anteriormente se reemplazan en la ecuación (15).

$$K = lqr(A, B, Q, R) \quad (15)$$

La cual permite hallar los valores de las ganancias de retroalimentación, que se muestran en a continuación: (K1=49,5803; K2=0,6304; K3= 0,0001; K4= 2,6984; K5= 1,9410).

Los estados intermedios son controlados con lo que se conoce como control óptimo de computadora, cuya ecuación es (16).

$$U = -Kx \quad (16)$$

Para calcular las matrices Q y R se emplearon los valores mínimos y máximo de trabajo de la trituradora, estos se pueden apreciar en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Valores máximos y mínimos que permiten calcular las matrices Q y R de desempeño cuadrático.

Nombre de la Variable de Estado	Unidad de Medida	Valor Mínimo de Trabajo		Valor Máximo de Trabajo		Diferencia de valores obtenidos experimentalmente
		Entrada (R)	Salida (Q)	Entrada (R)	Salida (Q)	
X1(Modelos de la Trituradora)	Peso (kg)	0	0	0	1,526	1,526
	Torque (N m)	10,56	0	12,79	0	2,23
X2(Movimiento Eléctrico)	Torque (N m)	0	10,56	0	12,79	2,23
	Velocidad Angular (Rad/s)	0	0	90		90
X3(Movimiento)	Velocidad	0	0	0	90	90

to Mecánico)	Angular (Rad/s)					
	Corriente (A)	3	0	0,1	0	2,9
X4(Driver de Control y Potencia)	Corriente (A)	0	3	0	0.1	2,9
	PWM (Hz)	625	0	0	0	625
X5(DAQ Arduino-MEGA)	PWM (Hz)	0	625	0	0	625
	Voltaje (V)	5	0	0,1	0	4,9

Fuente: Autor

Lo señalado anteriormente se muestra en la Figura 3.14, donde se puede apreciar que la posición es analoga al torque.

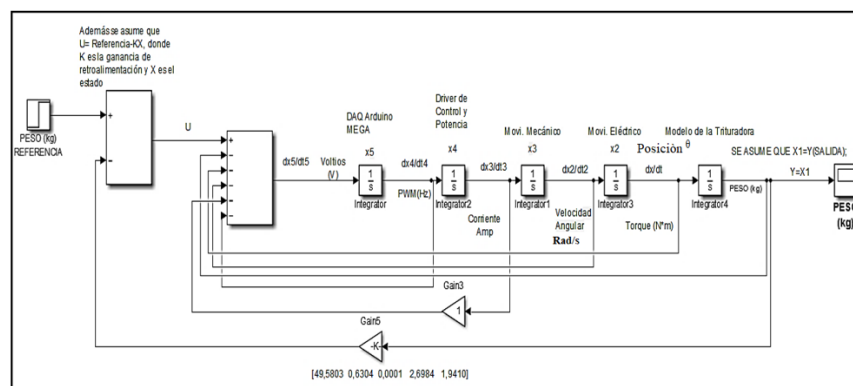


Figura 3.14 Diagrama de bloques de los espacios intermedios, Fuente: Autor.

El esquema de control que emplea una entrada escalón unitario que se puede apreciar en la Figura 3.15. Aquí se ven las salidas: el peso y la posición de giro de la tuerca, que hace posible apretar las mandíbulas del prototipo de trituración de cobre. Las cuales no logran llegar al valor de cero, debido principalmente a que se debería mejorar la potencia del servomotor, ver en la página 204 de (Dorf, R., & Bishop, 2008), más información al respecto.

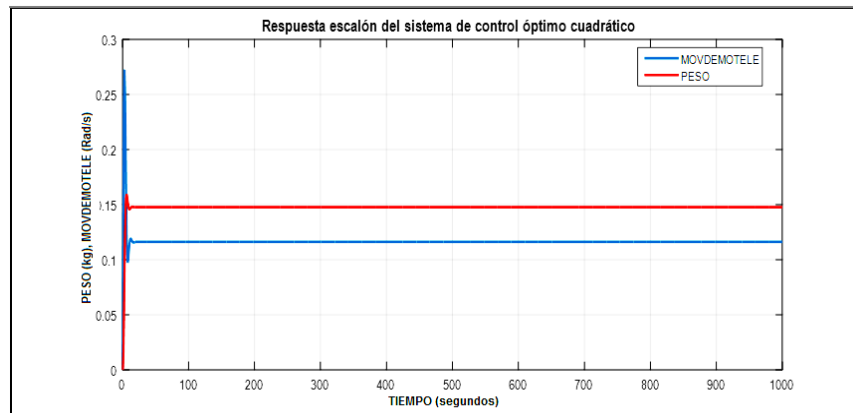


Figura 3. 15 Respuesta escalón del sistema de control óptimo cuadrático, Fuente: Autor.

Se logró obtener el comportamiento de cada uno de los estados intermedios de la trituradora que como se muestra en la Figura 3.16, todos tienden a cero, excepto dos que son el peso y la velocidad angular.

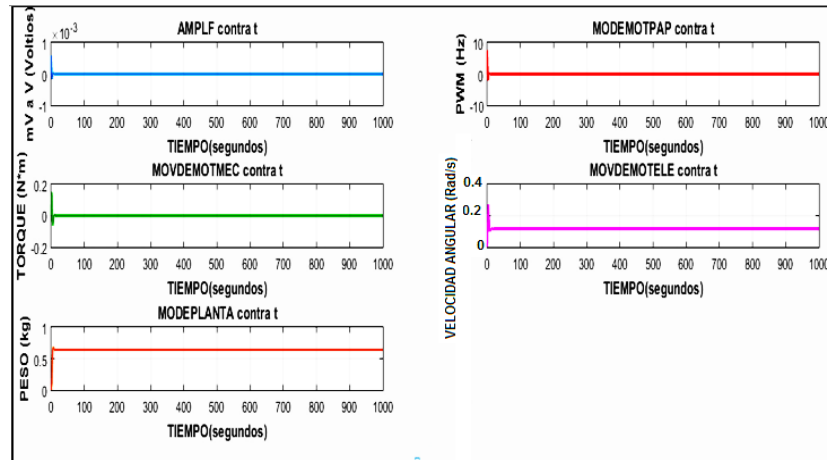


Figura 3. 16 Respuesta de los estados intermedios de la trituradora, que se pueden apreciar mejor, en el diagrama de bloques de la Figura 3.14, Fuente: Autor.

A continuación, se muestra la Tabla 3.7 para indicar los parámetros que se han obtenido, cuando al proceso se aplican 4 técnicas diferentes de control, con una entrada escalón y durante 10 segundos de simulación. Según esto el que mejor resultado dio fue el Predictor de Smith, señalándose con rojo los parámetros de cada estrategia que no son aceptables y que son motivo para que se descarten esas estrategias. El máximo sobrepico para el controlador de Smith fue el mejor con un 2%, lo que no ocurrió con el MPC. que claramente mostro un sobrepico exagerado, aunque hay una pequeña mejoría en los otros parámetros a controlar.

Tabla 3.7 Comparación de aplicar diferentes controladores para el lazo de control.

	CONTROLADOR 1(PID)	CONTROLADOR 2 (PREDICTOR DE SMITH)	CONTROLADOR 3 (MPC) PESO POSICIÓN	CONTROLADOR 4 (LQR)
MÁXIMO SOBREPICO	-5%	2 %	2 100 % 16%	No medible
TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN	17,58 s	37 s	25 s 10 s	0 s todos los estados
TIEMPO DE SUBIDA O LEVANTAMIENTO	15 s	25 s	-22 s 4 s	Peso: 22 s, Vel-Ang: 14 Rad/s, los demás son despreciables
ERROR EN ESTADO ESTABLE	0,2 kg	0,04 kg	0,01 kg 0,01kg	Peso: 0,05 kg, Vel-Ang: 0,01 Rad/s, los demás son despreciables

Fuente: Autor.

Además, de todos los criterios que se usaron para la selección del controlador basado en PS (Predictor de Smith) y que se muestran en la Tabla 3.7, se comparó con los resultados obtenidos y presentados en diferentes congresos y revistas y que se detallan a continuación: Por ejemplo, en (Benavides, L., Valarezo, Michael & Tapia, 2015), se alcanzaron los mejores

resultados con un controlador basado en PS, pero con sobre pico de aproximadamente de un 55% , y con tiempos de subida y estabilización de 5 y 2,9 segundos, respectivamente. Esto es debido al retardo por transporte existente en este proceso y que es uno de los factores que más afectan la calidad y estabilidad de un sistema de control, ya sea esté basado en un PID u otro cualquiera.

También el tiempo de muestreo, afectó para este gran sobrepico. Ya que según (Aguado, 2010) un correcto tiempo de muestreo debe ser de 8 a 10 veces menor que la constante de tiempo del sistema, lo que, al usar el prototipo en tiempo real, dio muy buenos resultados. Además, los resultados presentados en (Benavides, J., Pozo, A., & Salinas, 2016), muestran las diferentes estrategias aplicadas en tiempo real al prototipo de trituración binaria.

Así mismo, en (Benavides, L., & Pozo, 2015), se aplicaron varias estrategias de control a este proceso como son: PID, PS, MPC, siendo este último el control basado en MPC el que alcanzó mejores resultados, pero en tiempo simulado y no así en tiempo real. También, cuando se utilizó el programa LabVIEW™ y una señal de entrada con diferentes consignas a este prototipo, tal como se puede apreciar en (Benavides, L., Salinas, E., Alvarado, F., Ochoa, J., & Paladines, S., Riofrío, G., & Granda, 2017), se obtuvieron valores muy interesantes al controlar la velocidad de la banda que transporta el material triturado, esto se alcanzó con la ayuda de un variador de frecuencia y un encoder absoluto para cerrar el lazo del control.

Es así, que por todo lo antes expuesto, la mejor estrategia de control en *tiempo real que controla al prototipo de trituración desarrollado en la UNL y que se destaca por su sencillez y efectividad es la llamada PS.*

Seguidamente, se recomienda revisar el Anexo E, en el cual se detalla el desarrollo de la práctica de una Columna de

Destilación Binaria, proceso que en la actualidad es parte de un proyecto que tiene que ver con su construcción y puesta en funcionamiento, permitiendo reforzar el uso de esta práctica al realizarla en tiempo real y no solamente simulado.

3.4 Conclusiones parciales

1. Se encontró un modelo matemático para la trituradora de primer orden y con retraso de tiempo por la banda transportadora. Este modelo fue integrado a un lazo principal de un control clásico en cascada, debido a que ofrece una solución mejor que el control con un solo regulador. Además, demostró ser más inmune a la perturbación y tener una respuesta más rápida y exacta.
2. Se mostró en la Tabla 3.7 los resultados al aplicar diferentes tipos de controladores al modelo de la trituradora y el que mejor resultado dio fue el controlador basado en la estrategia Predictor de Smith, debido a que controla, a pesar del retraso presente en el transporte del material triturado hacia la zaranda y a la celda de carga, permitiendo obtener el peso a la salida del experimento.
3. Se mejoró el tiempo de estabilización al usar una señal con diferentes valores de consigna que produce un aumento del tiempo de muestreo y esto es correcto, ya que la variable controlada que es el peso (incluida la banda transportadora), es mucho más lenta que la variable intermedia de posición del motor PAP, justificándose el uso de la estructura de control en cascada.
4. Se pudo reducir el consumo, tal como se puede comprobar en las gráficas, al aplicar estos sistemas de control para lograr un par constante en la banda transportadora del material. Los ahorros de energía más importantes se tendrán en las cargas de par cuadrático, donde una pequeña disminución de

velocidad produce una gran disminución de potencia absorbida por el motor.

CONCLUSIONES

- De la búsqueda realizada de laboratorios virtuales y/o remotos se encontró que en abril del 2016 había 3 000 artículos al respecto, pero en junio de este mismo año ya eran 6 000 artículos escritos, de los cuales solo 84 eran dedicados a dar solución al consumo energético y mejorar la eficiencia a través del control automático del proceso de trituración de cobre y de destilación de columnas binarias.
- Se diseñó y construyó un prototipo a escala de laboratorio del proceso de trituración del cobre y se construyó teniendo la ayuda de los estudiantes de la UNL como colaboradores. En el diseño se le adicionó un tambor para mejorar la trituración cuestión que representa una novedad. Además, lo hace muy didáctico y fácil de controlar por los estudiantes.
- Se diseñó la práctica virtual tanto de la trituradora como de la columna de destilación binaria, precisando los tres momentos que tiene este tipo de práctica. Un momento inicial en clase donde el alumno con la ayuda del docente aprende la teoría, un segundo momento empleando una herramienta de software adecuado como MATLAB®, donde ensaya algoritmos de control estudiados teóricamente en plantas reales. Finalmente, la evaluación y autoevaluación del trabajo tanto autónomo como grupal, siempre ajustando los contenidos de la asignatura a una regulación que da una programación por créditos y basada en competencias.
- Se diseñó la práctica remota solo para la trituradora, precisando los tres momentos que tiene este tipo de práctica, similar a la de la práctica virtual. Un momento inicial en el aula donde el alumno con la ayuda del docente desarrolla un aprendizaje por competencias y significativo. Un segundo momento empleando una herramienta de software adecuado como MATLAB®, esto conlleva una mayor flexibilidad de utilización de los

laboratorios reales y un uso más racional de los recursos disponibles. Finalmente, la evaluación de cada una de las prácticas que se puede realizar con el prototipo desarrollado en la UNL.

- Se desarrolló una metodología para la simulación del proceso de destilación del petróleo de una mezcla en laboratorios virtuales, de manera de explicarlo de una forma sencilla y dinámica con la ayuda de MATLAB® a los estudiantes. Esta metodología es muy importante para la UNL, ya que se podrá vincular a las empresas privadas a la Universidad, por ejemplo, la de minería y la del petróleo del Ecuador.
- En la Tabla 3.7 los resultados al aplicar diferentes tipos de controladores al modelo de la trituradora y el que mejor resultado dio fue el controlador basado en la estrategia Predictor de Smith, principalmente por el retraso presente en el transporte del material triturado hacia la zaranda y finalmente a la celda de carga que permite conocer el peso a la salida del experimento.
- Se mostró en la Tabla E.4 el resultado obtenido, cuando se aplican al proceso 2 técnicas diferentes de control avanzado, en el caso del control difuso con una entrada escalón de 100 segundos de simulación, y de 1 000 segundos en el caso del regulador basado en LQR. Debido principalmente a esta diferencia de tiempo, es la causa por la cual se demora mucho más tiempo en estabilizarse el proceso con esta última estrategia. Revisando los resultados obtenidos el control que mejor requisito cumple es el basado en la técnica de Lógica Difusa, ya que el control fundamentado en LQR., tiene un gran tiempo de estabilización, sobrepasando los 1 000 segundos, excepto en la presión que está alrededor de 290 segundos.

RECOMENDACIONES

A continuación, se plantean algunas recomendaciones:

- Utilizar más laboratorios en tiempo diferido por lo complicado que resulta implementar laboratorios remotos, principalmente por los problemas generados por gestión que se dan cuando se tienen que soportar muchos usuarios a la vez y por la naturaleza del experimento cuando por ejemplo son controlados con controladores PID, ya que se necesitaría que pase más tiempo.
- Emplear una gestión más avanzada con HTML5 y de manera segura usando https y asegurando que nadie acceda al hardware solo quien debe, por ejemplo, acceder a los controles de LabVIEW™ y acceder a la gestión en tiempo real, empleando estándares abiertos como websockets.
- Utilizar un doble tambor y placas planas y no en diente de sierra para triturar el material de la mina, ya que da mejores resultados.
- Realizar un diseño de control de procesos en toda la planta con las directrices para la trituración y cribado de los procesos obtenidos en este trabajo.

REFERENCIAS

- Abuhasel, K. (2019). A comparative study of regression model and the adaptive neuro-fuzzy conjecture systems for predicting energy consumption for jaw crusher. *Applied Sciences*, 9 (18), pp. 2-12. <https://doi.org/10.3390/app9183916>.
- Abraham, A., Pappa, N., Shanmugha Priya, M., & Hexy, M. (2017). Predictive control design for a MIMO multivariable process using order reduction techniques. *International Journal of Modelling and Simulation*, 37 (4), pp. 199–207. <https://doi.org/10.1080/02286203.2017.1326303>.
- Acuña, M. (2014). Desarrollo de un Sensor Virtual basado en Modelo NARMAX y Máquina de Vectores de Soporte para Molienda Semiautógena. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industria*, 11 (1), pp. 109-116.
- Aguado, A. (2010). *Temas de Identificación de Control Adaptable*. La Habana, Cuba, ICIMAF. Instituto de Cibernética Matemática y Física.
- Aguilar, J. (2018). Planeación educativa y diseño curricular: un ejercicio de sistematización. *Cathedra et Scientia. International Journal*, 4 (1), pp. 7-25.
- Airikka, P. (2013). PID and Predictive PID Control Design for Crushing And Screening. En: *For the 18th Nordic Process Control Workshop*. Metso Automation. Tampere, Finland.
- Airikka, P. (2015). Automatic feed rate control with feed-forward for crushing and screening processes. En: *IFAC-PapersOnLine*, 28, pp. 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.094>.

- Alfaro, V. M., Arrieta, O., & Vilanova, R. (2009). Control de Dos-Grados-de-Libertad (2-GdL aplicados al Benchmark de Sistemas para controladores PID. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 6 (2), pp. 60–61.
- Aliane, N. (2010). Experiencia de un laboratorio remoto y control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7 (1), pp. 85–90.
- Alzate, A. (2010). Modelado y control de una columna de destilación binaria (Thesis for: Master of Science Degree). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/306373786_Modelado_y_control_de_una_columna_de_destilacion_binaria
- Anderson, J., Silverstein, J., Ritz, S., & Jones, R. (1977). Distructive features categorical perceptron and probability learning some appliactions of a neuronal models *Psychological*, 84 (5), pp. 413–451.
- Andújar, J., & Barragán, A. (2014). Hibridación de sistemas borrosos para el modelado y control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 11 (2), pp. 127-141.
- Arias, S. (2012). Módulo de Realidad Virtual y simulación de procesos que facilite el aprendizaje del taller de control automático asistido por computadoras a los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Sistemas del Área de Energía las Industrias y los Recursos Naturales (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- Assilian, S. (1974). Artificial intellgence in the control of real dynamical systems (PhD thesis), Queen Mary College, London University.

- Åström, K., & Hägglund, T. (2009). Control PID avanzado. Prentice Hall. Madrid, España. ISBN: 978-84-8322-511-0.
- Aydogmuz, Z., & Aydogmuz, O. (2009). A Web-Based Remote Access Laboratory using SCADA in Education. IEEE Transactions on Automatic Control, 52 (1), pp. 126–132.
- Bandyopadhyay, S., Ranjan, K., & Shenoy, U. (2003). Feed Preconditioning Targets for Distillation through Invariant Rectifying–Stripping Curves, Industrial & Engineering Chemistry Research, American Chemical Society. 42 (26), pp. 6851-6861. <https://doi.org/10.1021/ie020894r>.
- Benavides, L., Ochoa, J., Orellana, E., & Salinas, E. (2014). Diseño, Automatización y Control de un prototipo a escala de laboratorio para trituración De Cobre. En: XV Congreso Latinoamericano de Control Automático CLCA 2014, Quintana Roo, Cancún, México, pp. 32-36.
- Benavides, L & Arias, S. (2012). Implementación de Laboratorios Virtuales y Remotos. Vinculación con la Colectividad, Universidad Nacional de Loja, 2 (2), pp 38–42.
- Benavides, L., & Pozo, A. (2015). Uso de las CADCS para la identificación del modelo de un prototipo de trituración de cobre. En: XVI Convención de Ingeniería Eléctrica CIE 2015. Villa Clara-Cuba. ISBN: 978-959-312-025-8.
- Benavides, L., Valarezo, Michael & Tapia, D. (2015). Diseño de un servomecanismo, que permita el control de una trituradora a escala de laboratorio. En: CHILECON 2015. Santiago-Chile. ISBN: 978-1-4673-8755-2.
- Benavides, J., Pozo, A., & Salinas, E. (2016). Identification and Control of a laboratory-scale prototype for crushing copper. IEEE Latin America Transactions, 14 (2), pp. 549–559.

- Benavides, L., Paz, H., Alvarado, F., & Cuenca, J. (2016). Intelligent systems applied to the control of a distilling binary column. En: IEEE ICA-ACCA 2016 IEEE Xplorer. Talca, Chile.
- Benavides, L., Salinas, E., Alvarado, F., Ochoa, J., & Paladines, S., Riofrío, G., & Granda, J. (2017). Control of a Prototype for the Classification of Copper. En: CHILECON 2017 IEEE Xplorer. Pucón, Chile.
- Bequette, B. (1988). Process Dynamics Modeling analysis and simulación, 2nd Edition. Prentice Hall, ISBN: 0-13-206889-3. pp. 10-12.
- Bhat, V., Thirunavukkarasu, I., George, V., & Sreelatha, C. (2019). Controller Design and Implementation for a Pilot Plant Binary Distillation Column. En: IEEE Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics, DISCOVER 2018 – Proceedings. pp. 71–75. <https://doi.org/10.1109/DISCOVER.2018.8674066>.
- Blevins, T., & Nixon, M. (2010). Batch and Continuous Processes. 13th Edition, International Society of Automation, Ottawa, Canada. ISBN: 978-1936007547.
- Bobo, T. (2008). Split on line digital image analysis systems to quantify particle size, shape and color for real time process control of crushed materials. En: GECAMIN The mining Industry Autominig. Santiago, Chile. pp. 152–153.
- Boyd, S., Ghaoui, E., Feron, E., & Balakrishnan, V. (2015). Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. Compilation of Department of Mathematics University of Stuttgart Germany.
- Brandstetter, P. (2014). Sensorless control of DC drive using artificial neural network. Acta Polytechnica Hungarica, 11 (10), pp. 5–20.

<https://doi.org/10.12700/APH.11.10.2014.10.1>.

- Cardona, D., & Sánchez, J. (2010). Indicadores Básicos para Evaluar el Proceso de Aprendizaje en Estudiantes de Educación a Distancia en Ambiente e-learning. *Formación Universitaria*, 3 (6), pp. 15–32.
- Cerezo, F., & Sastrón, F. (2015). Laboratorios Virtuales y Docencia de la Automática en la Formación Tecnológica de Base de Alumnos Preuniversitarios. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 12 (4), pp. 419–431.
- Cuevas, A., & Cipriano, A. (2008). State and Ore Hardness Estimation in Semiautogenous Grinding”. En: *Proceedings of the 17th IFAC World Congress, Seoul-Korea*.
- Creus, A. (2007). *Instrumentación Industrial*. 7th Edition. Alfaomega, ISBN: 970-15-1150-2.
- García, J., Cerdas, V., & Torres, N. (2018). Gestión curricular en centros educativos costarricenses: Un análisis desde la percepción docente y la dirección, *Revista electrónica Educare*, 22 (1), Recuperado de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/1941/194154980010/html/index.html>.
- Gómez, V. (2015). *La pirámide de la desigualdad en la educación superior en Colombia. Diversificación y tipología de instituciones*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Chaos, D., Chacon, J., Lopez-Orozco, J., & Dormido, S. (2013). Virtual and remote robotic laboratory using ejs, matlab and labview. *Sensors*, 13 (2), pp. 2595–2612. <http://doi.org/10.3390/s130202595>.
- Davison, J. (1990). Control of a distillation column with

- pressure variation. En: IFAC Benchmark Problems for Control System Design. pp. 2-4.
- Delgado, L., Fernández, L., & Vargas, G. (2011). Modelación, Simulación y Control del sistema de ventilación de una planta de ingredientes farmacéuticos activos. En: JICIMAF. La Habana, Cuba.
- Del Brío, B., & Sanz, M. (2007). Redes Neuronales y Sistemas Borrosos, 3rd Edition. Alfaomega, ISBN:978-970-15-1250-0.
- Donovan, J. (2003). Fracture Toughness Based Models for the Prediction of Power Consumption, Product Size, and Capacity of Jaw Crushers (Tesis Doctoral). Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Fracture-Toughness-Based-Models-for-the-Prediction-Donovan/c4723d7c35be34f74e4445c2b11cf86023da02b3>
- Dormido, S. (2014). Laboratorios/Remotos: Una Taxonomía. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 7(1), pp. 5-9.
- Dorf, R., & Bishop, R. (2008). Sistemas de Control Moderno, 10th Edition. Prentice-Hall. pp. 204-215. ISBN: 978-84-205-4401-4.
- Duarte, J, Zapata, L., and Rentería, R. (2010) FAMILIA Y PRIMERA INFANCIA: UN ESTADO DEL ARTE. 1994-2005. Estudio Pedagógico, 36 (1), pp.107-116. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07052010000100005&lng=es&nrm=iso.
- ECSA. (2010). ECUACORRIENTE. Recuperado de <http://www.ecuacorriente.com/>.
- ECSA. (2012). Informe del Proyecto Estratégico Minero

Mirador, Socialización al Medio Externo. Recuperado de <https://www.bnamericas.com/company-profile/es/ecuacorriente-sa-ecuacorriente>.

Espinoza, P. (2008). Ambientes de aprendizaje fundamentados en la cognición en la práctica. *Revista DIDAC*, 52, pp. 3-9. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=6621>.

Estriegana, R., Medina, J., & Barchino, R. (2019). Student acceptance of virtual laboratory and practical work: An extension of the technology acceptance model. *Computers and Education*, 135, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.02.010>.

Fernández, L. (2012). Identificación de sistemas con los CADCS. En: *Jornadas Científicas en el ICIMAF (JICIMAF)*, La Habana, Cuba.

Fernández, M., Muñoz, C., Rubio, E., & Benavides, L. (2016). Ventana virtual para macrolaboratorio de automatización. En: *XXIX Congreso SOCHEDI 2016, Chileno de Educación para ingeniería UFRO 2016*. Pucón, Chile.

Foggiatto, B. (2017). *MODELLING AND SIMULATION APPROACHES FOR EXPLOITING MULTI-COMPONENT CHARACTERISTICS OF ORES IN MINERAL PROCESSING CIRCUITS* B.Sc. (thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy). The University of Queensland, Australia.

Francisco de la Cruz, M. (2010). Web-LABAI, Laboratorio Remoto de Automatización Industrial. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7 (1), pp. 101-106.

Gamalero, M., & Luppi, P. (2013). Evaluación de factibilidad de mejoras empleando control predictivo basado en

- modelos en reactores de biodiésel. Facultad Regional Rosario (UTN). pp. 24-20. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/c944/bcdc65a9d910993ea3c34f507059114f2720.pdf>.
- Gaviño; R. (2010). *Introducción a los Sistemas de Control*, 1 st Edition. Prentice Hall, ISBN: 978-607-442-842-1.
- Grande, J., Aroba, J., De La Torre, M., & Beltran, L. (2005). "Precipitation pH and metal load in AMD river basins an application of fuzzy clustering algorithms to the process characterization. *Journal of Environment*, 7 (4), 325–334.
- Grossberg, S. (1987). Competitive learning from interactive activation to adaptative resonance. *Cognitive Science*, 11 (1), pp. 23–63.
- Guo, J., Kettler, D., & Al-Dahhan, M. (2007). A chemical engineering laboratory over distributed control and measurement systems. *Computer Applications in Engineering Education*, 15 (2), pp. 174–184.
- Gutiérrez, W., Fernández, M., & Mantilla, W. (2015). "Aplicación de modelos de formación conjunta en el ámbito de la ingeniería. En: XXVIII Congreso Chileno de Educación en Ingeniería, SOCHEDI 2015. Copiapó, Chile.
- Guyot, O., Valery, W., & La Rosa, D. (2004). VisioRock and integrated vision technology for advanced control of aggregate circuits. En: *Proceedings Computer Science*. pp. 1–11. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/VisioRock-%2C-an-integrated-vision-technology-for-of-Guyot-Valery/b9f2b713b9d74b19a9a7faf3a6fe9ff5b960beab>.
- Hamdy, M., Ramadan, A., & Abozalam, B. (2018). Comparative study of different decoupling schemes for TITO binary distillation column via PI controller. *IEEE/CAA Journal*

- of *Automatica Sinica*, 5(4). pp. 869–877.
<https://doi.org/10.1109/JAS.2016.7510040>.
- Hanson, B., Culmer, P., Gallagher, J., Page, K., Road, E., Weightman, A., & Levesley, M. (2009). ReLOAD: Real Laboratories Operated at a distance, *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 2 (4), pp. 331–341.
- Hayashi, I., & Takagi, H. (1991). NN-driven fuzzy reasoning. *International Journal of Approximate Reasoning*, 5 (3), pp. 192-212. [https://doi.org/10.1016/0888-613X\(91\)90008-A](https://doi.org/10.1016/0888-613X(91)90008-A).
- Hatch, C., & Mular, A. (1982). Simulation of the brenda mine ltd. secondary crushing plant. *Mining Engineering*. pp. 1354–1362.
- Henke, K., Ostendorff, S., Wuttke, H., & Vogel, S. (2012). Agrid Concept for Reliable, flexible and robust remote engineering laboratories. En: 9th International Conference on Engineering and Virtual. pp. 1–8. Bilbao, Spain. <http://doi.org/10.1109/REV.2012.6193110>.
- Henry, J., & Schaedel, H. (2005). International Cooperation in Control Engineering Education Using Remote Laboratories. *European Journal of Engineering Education*, 30 (2), pp. 265–274. <https://doi.org/10.1080/03043790410001065678>.
- Hernández, M., Vallejo, A. & Morale, R. (2019), *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*,13 (3). pp. 947-966. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00558-7>.
- Hopfield, J. (1982). Neuronal networks and physical systems with wncergentg collective computational abilities. En: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 79 (8), pp. 2554–2558.

<https://doi.org/10.1073/pnas.79.8.2554>.

- Huick, K., De Branbanter, F., Logist, F., De Branbanter, J., Imper, V., & De Moor, D. (2011). Identification of a Pilot Scale Distillation Column: A Kernel Based Approach. En: Preprints of the 18 th IFAC World Congress, Milano, Italy, pp. 471–476.
- Ionescu, C. M., Fabregas, E., Cristescu, S. M., Dormido, S., & De Keyser, R. (2013). A Remote Laboratory as an Innovative Educational Tool for Practicing Control Engineering Concepts. *IEEE Transactions on Education*, 56 (4), pp.436– 442.
- Jani, K., Jari, H., Martti, L., Heikki, H., & Miettunen, J. (2005). Image Analysis Based Control of Copper Flotation. En: Proceedings 16th IFAC World Congress. Praga, República Checa, pp. 1-6.
- Jiménez, A., Aroba, J., De La Torre, M., Andújar, J., & Grande, J. (2009). Model of behaviour of conductivity versus pH in acid mine drainage water, based on fuzzy logic and data mining techniques. *Journal of Hydroinformatics*, 11 (2), pp. 147– 153.
- Jung, S. (2013). Experiences in developing an experimental Robotics Course Program for Undergraduate Education. *IEEE Transactions on Education*, 56 (1), pp. 129–136.
- Kohonen, T. (1988). *Self Organization and Associative Memory Springer Series in information Scienses*, 2nd Edition. Springer Series in Information Sciences, ISBN: 978-3540183143.
- Kuo, B. (2012). *Sistemas de Control Automático*, 7th. Prentice Hall, ISBN: 968-880-723-0.
- Lane, G., Foggiatto, B. & Bueno, M. (2013). Power-based

- comminution calculations using Ausgrind. En: 10th International Mineral Processing Conference Gecamin. Santiago, Chile. pp. 85-96.
- Larburu, N. (2008). Máquinas Prontuario, Técnicas Máquinas Herramientas. 13th Edition. Thomson. Madrid-España. ISBN: 9788428319683.
- Li, Z., Ren, H., & Gan, D. (2015). Laws of energy consumption distribution and energy saving way during magnetite ore grinding process. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*, 36, pp. 189–192.
- Liu, D. H., Yuan, Y., Chen, H. S., Qian, X., Zhang, L., & Huang, K. (2018). A compromise method for balancing steady-state design and dynamic control for binary distillation column. *Xiandai Huagong/Modern Chemical Industry*, 38 (4). pp. <https://doi.org/10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2018.04.049>.
- Liu, X., Zhang, B., & Chen, Q. (2016). Simultaneous optimization of the feed location and thermodynamic feed conditions for a distillation column based on column grand composite curves. *Qinghua Daxue Xuebao/Journal of Tsinghua University*, 56 (7), pp. 700–706. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2016.24.020>
- Liu, Y., & Spencer, S. (2004). Dynamic simulation of grinding circuits. *Minerals Engineering*, 17 (11-12), pp.1189–1198. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.05.018>.
- Ljung, L. (1999). *System Identification Theory for the user*. 2nd Edition, Prentice Hall.
- Lowe, D., Yeung, H., Tawfik, M., Sancristobal, E., Castro, M., & Richter, T. (2016). Interoperating remote laboratory management systems (RLMSs) for more efficient Sharing of Laboratory Resources. *Computer Standards & Interfaces*,

43(9), pp. 21–29.
<https://doi.org/10.1016/j.csi.2015.07.004>.

Luyben, W. (2014). *Process Modeling and Control for Chemical Engineers*, 13th. Mc-Graw Hill Intenational, ISBN: 9780071007931.

Maerz, N. (1996). Wipfrag image based granulometry system. En: *Proceedins of the FRAGBLAST5 Workshop on Measurement*. Quebec, Cánada, pp. 91–99.

Mamdani, E., & Assilians, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with fuzzy logic controller. *International Journal of Man Machine Studies*, 7 (1), pp. 1–13.

Márquez, J., & Sanguino, T. (2010). Diseño de laboratorios virtuales y /o remotos. un caso práctico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7 (1), pp. 64–72.

MATLAB®. (2014). *Control Tutorials para MATLAB®/Simulink®*. Recuperado de <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>.

Ministerio de Educación Nacional -MEN- (2018). *Enfoque e identidades de género para los lineamientos política de educación superior inclusiva*. Bogotá: Ministerio de Educación Nacional.

Mendel, J. (1995). *Fuzzy Logic Systems for Engineering: a Tutorial*. En: *Proceedings of the IEEE*, 83 (3), pp. 345-377. <https://doi.org/10.1109/5.364485>.

Mero, O., Tapia, M., & Ramos, M. (2018). *Rediseño curricular de la Carrera de Ingeniería Forestal en la Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador*. *Revista Conrado*,

13(59), pp. 212-221.

Mohtadi, C., McAree, O., & Schlosser, J. (2014). Bridging the skills gap in STEM industries. In SEFI Annual Conference 2014. European Society for Engineering Education (SEFI).

Moliner, R., & Tanda, R. (2016). Herramienta para la sintonía robusta de controladores PI/PID de dos grados de libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 13 (1), pp. 22–29.

Morales, G. (2002). *Introducción a la lógica difusa*. México: Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV-IPN). Recuperado de <http://delta.cs.cinvestav.mx/~gmorales/ldifll/ldifll.html>.

Moriano, P., & Naranjo, F. (2012). Modelado y control de un nuevo sistema bola viga con levitación magnética. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 9 (3), pp. 249-258.

Morilla, F., Garrido, J., & Vázquez, F. (2013). Control Multivariable por desacoplo. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 10 (1), pp. 3–17.

Mudi, R., & Pal, N. (1999). A robust self-tuning scheme for PI-and-PD type fuzzy controllers. *IEEE Transactions on Fuzzy System*, 7 (1), pp. 2–16.

Mujtaba, I. (2004). *Batch Distillation: Desing and Operation*. 3rd Edition. Worl Scientific Publishing Co. ISBN: 1-86094-437-X.

Numbi, B., Zhang, J., & Xia, X. (2014). Optimal energy management for a jaw crushing process in deep mines. *Energy*, 68. pp. 337–348. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.100>.

- Núñez, F., Navarro, S., Aguado, A., & Cipriano, A. (2008). State Estimation Based Model Predictive Control for LHD Vehicles. En: Proceedings of the 17th World The International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea. pp. 1448-1453. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00248>.
- O'Dwyer, A. (2012). An Overview of Tuning Rules for the PI and PID Continuous-Time Control of Time-Delayed Single-Input, Single-Output. PID Control. Villanova & Visioli. In the Third Millennium. pp. 3-44. ISBN: 9781447124245.
- Ogata, K. (2010). Ingeniería de Control Moderno. 7th Edition. Prentice Hall. ISBN: 978-84-8322-660-5.
- Olivier, L., & Craig, I. (2011). Parameter mismatch detection in un a Run-of-Mine ore milling circuit under Model Predictive Control. En: Preprints of the 18 th IFAC World Congress, Milano, Italy. pp. 9929-9934.
- Ospina, M. (2009). Diseño para un sistema de control multivariable para un circuito de molienda en húmedo (Tesis de grado de Doctorado). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/30757903_Di_seno_de_un_sistema_de_control_multivariable_para_un_circuito_de_molienda_en_humedo.
- Otárola, A., Ostendorff, S., Wuttke, H., & Vogel, S. (2012). A grid Concept for reliable, flexible and robust remote engineering laboratories. En: 2012 9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), en Remote, pp. 1-8. <http://doi.org/1109/Rev-2012.6293110>.
- Paramasivan, G., & Kienle, A. (2011). Inferential Control of Reactive Distillation Columns - An Algorithmic Approach. Chemical Engineering and Technology, 34(8),

- pp. 1235–1244. <https://doi.org/10.1002/ceat.201100141>.
- Pawel, S., Jacek, W., Jakubiak, J., & Zimroz, R. (2017). Development of Test Rig for Robotization of Mining Technological Processes - Oversized Rock Breaking Process Case. En: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 95. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/4/042028>.
- Paz, H., Benavides, L., Castillo, H., & Anchundia, C. (2016). Methodology and proposal of control applied to a distillation column binary. En: XVII CLCA Latin America Conference of Automatic Control. Medellín, Colombia, pp. 631-638. ISBN: 978-958-8483-37-5.
- Perales, M., Pedraza, L., & Moreno, P. (2019). Work-in-progress: Improving online higher education with virtual and remote labs. En: IEEE Global Engineering Education EDUCON, (Vol. April-2019). pp. 1136–1139. <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2019.8725272>.
- Perry, R. (2018). PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS'. 9th, McGraw-Hill, pp. 50-69. ISBN: 978-0071422949.
- Ponce, P. (2012). Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería, 1st, Alfaomega, ISBN:978-607-7854-83-8.
- Quintero, G., Oñate, J., & Arias, L. (2011). Instrumentacion Electrónica aplicada a prácticas de laboratorio. Universidad del Norte, ISBN: 9789587411393.
- Rawlings, J., Mayne, D., & Diehl, M. (2012). Model Predictive Control Theory and Design. 2nd Edition, Nob Hill Publishing. pp. 1-172. ISBN: 978-0975937730.
- Restrepo, A. (2016). El malestar en la evaluación del aprendizaje en educación superior. Horizontes Pedagógicos, 18 (1), pp. 138-152.

<http://revistas.iberoamericana.edu.co/index.php/rhpedagogicos/article/view/935>.

- Rodríguez, M., Hernández, C., & Evangelista Neto, J. (2015). Identificación y Control Predictivo de una columna de destilación Etanol-Agua. En: XVI Convencion de Ingeniería Eléctrica CIE2015.Villa Clara, Cuba, pp. 1-7. ISBN: 978-959-312-025-8.
- Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65 (6), pp. 386–394.
- Rubio, E., Santana, I., Rohten, J., Esparza, V., & Martínez, B. (2018). Remote Laboratories for Control Education: Experience to classic PID Control Course. En: IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), pp. 1-6.
- Ruíz, V., & Alfaro, V. (2002). Ecuaciones para Controladores PID Universales. *Revista de la Universidad de Costa Rica*, 12 (1). pp. 11-20. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/260058601_ECUACIONES_PARA_CONTROLADORES_PID_UNIVERSALES.
- Santamaría, F., Ballesteros, J., & González, J. (2016), *Revista Científica del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 3(23). pp 98-110. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2015.23.a8>.
- Saleiro, M., Carmo, B., Rodrigues, J., & du Buf, J. (2013). A Low-Cost Classroom-Oriented Educational Robotics System. En: International Conference on Social Robotics. pp. 74–83. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02675-6_8.

- Salinas, J. (2004). Innovación docente y uso de las TIC en la enseñanza universitaria. *Revista (RUSC) Universities & Knowledge Society Journal*, 1 (1). pp. 1-16. <http://dx.doi.org/10.7238/rusc.v1i1.228>.
- Santana, I., Ferre, M., Hernández, L., & Aracil, R. (2010). Aplicaciones de sistemas de laboratorio a distancia en asignatura de regulación automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7 (1), pp. 46–53.
- Santana, I., Ferre, M., Izaguirre, E., Aracil, R., & Hernández, L. (2013). Remote laboratories for education and research purposes in automatic control systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9 (1), pp. 547–556.
- Santana, I., Hernández, L., Ferre, M., Pinto, E., & Cogollar, J. (2012). Analysis of a thermal system through remote laboratories. En: *Global Engineering Education Conference (EDUCON) IEEE*. pp. 1–7. <http://doi.org/10.1109/EDUCON.2012.6261083>.
- Santos, M., Dormido, S., & De la Cruz, J. (1996). “Fuzzy-PID controllers vs Fuzzy-PI controllers”. En: *5th IEEE International Conference on Fuzzy Systems FUZZ-IEEE'96*. New Orleans, Louisiana, USA, pp. 1598-1604.
- Salmerón, E., & Manzano, F. (2018). The higher education sustainability through virtual laboratories: The Spanish University as case of study. *Revista Sustainability*, 10 (11). pp. 2-22. <https://doi.org/10.3390/su10114040>.
- Sbarbaro, D. (2005). Control of Crushing circuits with variable speed drives. En: *Proceedings of the 16th IFAC World Congress , Prague, Czech Republic*, 38 (1). pp. 80-84. <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.01692> .

- Scokaert, P., & Rawlings, S. (1988). Constrained Linear Quadratic Regulation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43 (8). pp. 1163-1169. <http://doi.org/10.1109/9.704994>.
- Seborg, D., Edgar, T., & Duncan, A. (2004). *Process Dynamics and Control*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-471-00077-8.
- Shigley, J. (2001). *Teoría de Máquinas y mecanismos*. 3rd Edition. McGraw-Hill. pp.325-344. ISBN: 968-451-297-7.
- Sierra. (2012). *Implementación del Control Inteligente en un motor de corriente continua*. (Tesis de maestría), CUJAE, La Habana-Cuba.
- Staples, P., Lane, G., Braun, R., Foggiatto, B., & Bueno, P. (2015). Are SAG mills losing market confidence?. En: 6 th International Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology. Vancouver, Canada. pp. 1-17.
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1983). Derivation on Fuzzy Control Rules from Human Operator's Control Actions. En: *IFAC Fuzzy information*, Marsielle, France. 16 (13). pp. 55-60. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)62005-6](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)62005-6).
- Tang, k., Man, K. F., Chen, G., & Kwong, S. (2001). An optimal fuzzy PID controlle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48 (4), pp. 757-765.
- Touhafi, A., Braeken, A., Tahiri, A., & Zbakh, M. (2017). CoderLabs: A cloud-based platform for real time online labs with user collaboration. En: *The 2nd International Conference on Cloud Computing Technologies and Applications*, CloudTech 2016, Marrakesh, Morocco, pp. 317-324. <https://doi.org/10.1109/CloudTech.2016.7847716>

- Valera, A., Soriano, A., & Vallés, M. (2014). España Plataformas de Bajo Coste para la Realización de Trabajos Prácticos de Mecatrónica y Robótica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 11 (4), pp. 363-376.
- Vargas, A., & García, A. (2017). Rediseño Curricular enfocado a la Práctica Profesional. *ANFEI Digital*, 3 (6), pp. 1-9.
- Vargas, H., Sánchez, J., Jara., Candelas, C., Reinoso, O., & Diez, J. (2010). Docencia en Automática Aplicación de las TIC a la realización de actividades prácticas a través de Internet. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7 (1), pp. 35-45.
- Villeta, M., Lahera, T., Merino, S., Zato, J., Naranjo, J., & Jiménez, F. (2012). Modelo para la conducción eficiente y sostenible basado en Lógica Borrosa. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 9 (3), pp. 259-266.
- Wang, G., Yuan, X., & Yu, K. (2005). Review of Mass-Transfer Correlations for Packed Columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(23). pp. 8715-8729. <https://doi.org/10.1021/ie050017w>.
- Weinberg, J. (2003). Robotics in education: Low-cost platforms for teaching integrated systems. *Robotics & Automation Magazine. IEEE*, 10 (2), pp. 4-6.
- Weiss, N. (1985). *Jaw Crushers SME Mineral Processing Handbook*. New York, N.Y: Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers.
- Machado, R. (2003). Modelagem empírica de colunas de destilação utilizando redes neurais de wavelets para otimização e controle de processos (Tesis de Maestría).

Repositorio Institucional UFSC, Recuperado de <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/85912?show=full>.

White, D. (2012). Optimize Energy Use in Distillation. American Institute of Chemical Engineering (AIChE). pp. 35–41. Recuperado de <http://www.emerson.com/documents/automation/37912.pdf>.

Whiten, W. (1972). The Simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression. En: 10th International Symposium on the Application of Computer Methods in the Mineral Industry. Johannesburg, Sudafrica. pp. 317-323.

Wills, B., & Napier, T. (2008), Will's Mineral Processing Technology, 7th, Elsevier. ISBN: 0-7506-4450-8.

Yin, H., Silver, W., & Buckley, J. (1990). A nonlinear case Automatic. *Controllers Fuzzy Controller Theory*, 26 (3), pp. 513–520.

Yiqun, Y., & Ming, R. (1992). Bilinear Control Strategy for paper making process. *Revista Chemical Engineering Communications*. 111 (1). pp. 13-28. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/00986449208935978>.

Zachariadou, K., Yiasemides, K., & Trougakos, N. (2012). A low-cost computer controlled arduino-based educational laboratory system for teaching the fundamentals of photovoltaic cells. *European Journal of Physics*, 33 (6), pp. 1599-1610.

Zadeh, L. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 3 (1), pp.

28–44.

Zhao, Z., Tomisuka, M., & Isaka, S. (1993). Fuzzy gain scheduling of PID controllers. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 23 (5), pp. 1392–1398.

ANEXOS

ANEXO A

Los resultados parciales de esta investigación se han venido presentando en varios eventos de carácter internacional y han quedado publicado en sus memorias:

Laboratorios Virtuales:

Benavides, L., & Arias, S. (2012). Implementación de Laboratorios Virtuales y Remotos. En: XV Congreso Latinoamericano de Control Automático. Lima, Perú, pp. 143. ISBN: 978-612-4057-69-4.

Benavides, L & Arias, S. (2012). Implementación de Laboratorios Virtuales y Remotos. Revista Vinculación con la Colectividad, 2 (2), pp. 38–42.

Benavides, L., Fernández, M., & Rubio, E. (2016). Ventana virtual para el MacroLaboratorio de automatización. En: XXIX Congreso SOCHEDI 2016, Chileno de Educación para ingeniería UFRO 2016. Pucón, Chile.

Benavides, L., Alvarado, F., Paladines, S. (2017). Diseño y Construcción de una Columna de destilación Binaria, para ser implementada en el laboratorio virtual de la Universidad Nacional de Loja. En: V Congreso Internacional de Investigación y Actualización en Ingenierías. Galápagos, Ecuador, pp. 427-239. ISBN: 978-9942-759-18-4.

Benavides, L., Alvarado, F., Salinas, E., Calderon, J., Valarezo, M., Jacome, R. (2017). Infraestrutura da Tecnologia da informacao do Macrolaboratório de Controle Automático da UNL para un Ambiente Virtual de Aprendizagem. En: XIV Congresso Brasileiro de

Educacao en Engenharia. Joinville/SC, Brasil. pp. 1-8.
Recuperado de
http://www.abenge.org.br/sis_artigos.php.

Benavides, L., Calderón, J., & Salinas, E. (2017). Diseño e Implementación del MacroLaboratorio de Formación Conjunta, para la enseñanza de Control Automático de la Universidad Nacional de Loja. En: VII Congreso de Investigación e Innovación. Cusco, Perú. ISBN: 978-9942-759-48-1.

Benavides, L, Bustan, D., & Ochoa, J. (2018). Metodología para el aprendizaje del control automático del proceso de destilación binaria, haciendo uso de MATLAB® y Moodle. Revista Arjé, 12 (22). pp. 154-161.

Benavides, L, Riofrío, G., & Jara, D. (2018). Herramientas del Docente para enseñar Control Automático a través de prácticas de trituración de cobre. Revista Arjé, 12(22). pp. 465-472.

Minería de cobre:

Benavides, L., Paladines, S., Ochoa, J., & Ochoa, V. (2012). Control PID de una banda transportadora con LabVIEW™ y PDI utilizando MATLAB® en un proceso de minería de cobre. Revista de Control, Cibernética y Automatización (CCA), 1(1). pp. 1-6.

Benavides, L., Paladines, S., Ochoa, J., Alvarado, F., Torres, C., & Narvaez, C. (2013). Interfaz de LabVIEW™ y MATLAB® para comunicación con un S7200 de Siemens en el cual se van a simular el encendido y apagado de un motor en la minería de Cobre del Ecuador. En: JC-ICIMAF 2013, pp. 1-6. La Habana, Cuba. ISBN:978-959-7056-33-1.

Benavides, L., & Paladines, S. (2014). Minería de datos con aplicación en la minería del sur de Ecuador. En: Taller de

Control , Cibernética y Control 2014 (TCA). La Habana, Cuba. ISBN:978-959-7056-36-2.

Benavides, L., Ochoa, J., Orellana, E., & Salinas, E. (2014). Diseño, Automatización y Control de un prototipo a escala de laboratorio para la trituración De Cobre. En: XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático (CLCA 2014), Quintana Roo, Cancún, México. pp. 32-36.

Benavides, L., & Pozo, A. (2015). Uso de las CADCS para la identificación del modelo de un prototipo de trituración de cobre. En: XVI Convención de Ingeniería Eléctrica (CIE) 2015. Villa Clara, Cuba. ISBN: 978-959-312-025-8.

Benavides, L., Valarezo, Michael & Tapia, D. (2015). Diseño de un servomecanismo, que permita el control de una trituradora a escala de laboratorio. En: CHILECON 2015. Santiago, Chile. ISBN: 978-1-4673-8755-2.

Costa Junior, A., Alvarado, H., Benavides, L., Calderón, J., Valarezo, M & Castillo, H. (2017). N4SID Method Applied to Obtain a Discrete-Time Linear State Space System as a Mathematical Model of a Jaw Crusher Prototype. En: CHILECON 2017 IEEE Xplorer. Pucón, Chile.

Benavides, L., Salinas, E., Alvarado, F., Ochoa, J., & Paladines, S., Riofrío, G., & Granda, J. (2017). Control of a Prototype for the Classification of Copper. En: CHILECON 2017 IEEE Xplorer. Pucón, Chile.

Benavides, L., Riofrío, G., & Jara, D. (2018). Herramientas del docente para enseñar Control Automático a través de prácticas de trituración de Cobre. En: V Congreso Internacional de Investigación. Santa Elena, Guayas, Ecuador. ISBN: 978-9942-759-61-0.

Reyes, A., & Benavides, L. (2016). Identification and Control based on PID and Smith Predictor Applied to a Prototype

Crushing. Revista IJEAT, 5(6), pp. 50–55.
<http://doi.org/ISSN:2249-8958>.

Benavides, L., Loaiza, S., & Costa Junior, A. (2016). Modelamento matemático de um protótipo de britador de minérios utilizando identificação por subespaços com o método moesp. En: XXI Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2016. Vitória, Brasil.

Columnas de Destilación Binarias:

Benavides, L., Fernández, L., Salinas, E., Ochoa, J., & Alvarado, F. (2014). Torre de Fraccionamiento binaria controlada con LQR y Lógica Difusa. En: Taller de Control, Cibernética y Control 2014 (TCA). La Habana, Cuba. ISBN: 978-959-7056-37-9.

Benavides, L., Fernández, L., Salinas, E., Ochoa, J., & A. (2014). Comparison between Classical LQR and Difusa Controller Applied to Binary Distillation Column. En: The Fifth International Conference on Science and Engineering (ICSE2014). Yangon, Myanmar.

Benavides, L., Paladines, S., & O. (2014). Minería de datos, aplicados a una torre de fraccionamiento a escala de laboratorio. En: JC-ICIMAF 2014 (ICIMAF). La Habana, Cuba. ISBN: 978-959-7056-36-2.

Benavides, L., Valarezo, M., & Tapia, D. (2015). Multivariable control of a Binary Column. IJEAS, 2(12), pp. 18–23.
<http://doi.org/ISSN:2394-3661>.

Paz, H., Benavides, L., Castillo, H., & Anchundia, C. (2016). Methodology and proposal of control applied to a distillation column binary. En: XVII CLCA Latin America Conference of Automatic Control. Medellín, Colombia, pp. 631-638. ISBN: 978-958-8483-37-5.

Benavides, L., Paz, H., Alvarado, F., & Cuenca, J. (2016). Intelligent systems applied to the control of a distilling binary column. En: IEEE ICA-ACCA 2016 IEEE Xplorer. Talca, Chile.

Cuenca, A., & Benavides, L. (2016). Comparison PID and MPC Control, applied to a binary distillation column. Revista IJEAS, 3(6), pp. 70–74. <http://doi.org/ISSN:2394-3661>.

Benavides, L., Riofrío, G., & Jara, D. (2018). Metodología para el aprendizaje de Control Automático del proceso de destilación binaria, haciendo uso de MATLAB® y Moodle. En: V Congreso Internacional de Investigación, pp. 40-49. Santa Elena, Guayas, Ecuador. ISBN: 978-9942-759-61-0.

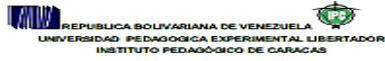
Benavides, L., & Jara, D. (2018a). Control de una columna de destilación fraccionada diseñada con SolidWorks, utilizando la biblioteca de simmechanics. Brazilian Journal of Development, 4(7), pp. 3846–3861. <http://doi.org/ISSN:2525-8761>.

Fueron publicados los siguientes artículos para revistas indexadas:

Benavides, L., Pozo, A., & Salinas, E. (2016). Identification and Control of a laboratory-scale prototype for crushing copper. IEEE Latin America Transactions, 14 (2), pp. 549–559.

Benavides, L., Calderón, J., & Salinas, E. (2018). Diseño e Implementación del Macrolaboratorio de Formación Conjunta, para la enseñanza de Control Automático de la Universidad Nacional de Loja. Revista de Investigación, 43 (97), pp. 60-76.

Benavides, L., Ochoa, E., Castillo, H., Riofrío, G., & Tocto, J. (2016). Uso de CAD para un sistema de identificación de molienda de Cobre. Revista MASKAY, 9 (2), pp. 41-50.



Caracas, 04-05-2018

Ciudadanos:
José Leonardo Benavides Maldonado
Jhon Calderón Sanmartín
Vilma Estefanía Salinas Nalvay
Ciudad.

Por la presente me dirijo a ustedes a fin de comunicarles que su artículo titulado: *Diseño e Implementación del Macrolaboratorio de Formación Conjunta, para la enseñanza de Control Automático de la Universidad Nacional de Loja*, ha sido aprobado para su publicación en la *Revista de Investigación*, órgano divulgativo de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Instituto Pedagógico de Caracas, de Venezuela, en el número 97 volumen. 43 correspondiente al período Mayo– Agosto del año 2019.

Atentamente

Delia Díaz de Tenoredi
Coordinadora – Editora de la Revista de Investigación

Figura A.1 Evidencia de que el artículo Diseño e Implementación de control automático de la UNL, fue aprobado para su publicación, Fuente: Autor

ANEXO B:

Publicación en la revista digital del Instituto de Derechos Intelectuales (IEPI), Gaceta 646 de la patente del prototipo de trituración, su verificación se puede ver en esta dirección electrónica:

<https://www.derechosintelectuales.gob.ec/gaceta-646/>.

DERECHOS INTELECTUALES	
DIRECCIÓN DE PATENTES	
Datos de la Solicitud	
Tipo de Patente	Patente de Invención
No. de Solicitud	SENADI-2018-77349
Fecha y hora de presentación	15/10/2018 13:05:15
Oficina que atenderá el trámite	
MATRIZ QUITO: (todas las demás provincias e internacionales)	
Título de la patente	
TRITURADORA TIPO MANDIBULA	
Clasificación internacional de patentes	
B02C1 / 025 **	
Solicitantes	
- 1 -	
Tipo de identificación	Pasaporte/DNI
Número de documento	1102967226
Nombre	Jose Leonardo Benavides Maldonado
Dirección	Sucre entre RosaFuerte y 10 de Agosto
País de Nacionalidad	Ecuador
Ciudad	Loja
Email	josephh2004@yahoo.es
Teléfono	+5930959167589
Fax	593
Inventores/Diseñadores	
- 1 -	
Tipo de identificación	Pasaporte/DNI
Número de documento	1102967226
Nombre	Jose Leonardo Benavides Maldonado
Dirección	Sucre entre RosaFuerte y 10 de Agosto
País de Nacionalidad	Ecuador
Ciudad	Loja
Email	josephh2004@yahoo.es
Teléfono	+5930959167589
Fax	593
- 2 -	
Tipo de identificación	Pasaporte/DNI
Número de documento	1103596464
Nombre	Edison Orellana
Dirección	La Paz
País de Nacionalidad	Ecuador
Ciudad	Loja
Email	edison2005@yahoo.es
Página 1/2	
646	

DERECHOS INTELECTUALES		
Teléfono	593 096032486	
Fax		
Inventos referentes a procedimiento biológico		
Lugar de depósito	Fecha	
Declaraciones de prioridad		
País	Número	Fecha
Ecuador	1102967226	26/07/2018
Representante Legal o Apoderado		
Tipo de representación	Representante	
Tipo de identificación	Pasaporte/DNI	
Número de documento	1102967226	
Nombre	Jose Leonardo Benavides Maldonado	
Dirección	Sucre entre RosaFuerte y 10 de Agosto	
Email	josephh2004@yahoo.es	
Teléfono	+5930959167589	
Fax	593	
Resumen		
El presente trabajo se ocupa del área de trituración y molinero porque es la que consume el 50% de la energía. Para su estudio contamos con un prototipo diseñado con SolidWork y AutoCad. En el Laboratorio Virtual de la UNL, hemos preparado una práctica modular y controlar este tipo de proceso. Los estudiantes emplean Matlab y Simulink para implementar las soluciones fuera de línea (off line). Para el trabajo en tiempo real emplean LabView.		
Observaciones		
Es un prototipo a escala de laboratorio que toma como modelo uno existente, y que es de marca Felch, pero con un doble tambor, para mantener la estabilidad, es la novedad, además de la forma de triturar, es con placas dientes de sierra, apretadas con un perno en la parte inferior.		
Descuento		
Se adjunta un documento habilitante para acceder a un descuento.		
Documentos que se acompañan a la solicitud		
<ul style="list-style-type: none"> • Documento de imágenes • Comprobante de tasa de Mantenimiento • Memorias técnicas • Reivindicaciones • Dibujos • Declaración Juramentada 		
Página 2/2		
646		

Figura B.1 Evidencia de la patente de la trituradora, Fuente: Autor.

ANEXO C:

Certificaciones del apoyo de los estudiantes y convenios firmados con los centros que conforman el MFC. Se adjuntan en formato PDF y se muestra la siguiente dirección en dropbox para poder lograr los avances del proyecto denominado MFC, el cual se puede apreciar en este link: <https://mfc.unl.edu.ec/>



Loja 10 de agosto de 2016

Sr. Dr.
Rafael Alberto Fernández Fernández
Universidad de Talca
Ciudad.-


De mis consideraciones:

Yo Jaime Javier Vallejo Figueroa estudiante de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA EN EL AREA DE LA ENERGIA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES, con número de cédula 110508913, pongo a su conocimiento que estoy cumpliendo pasantías en el proyecto titulado "MACROLABORATORIO DE FORMACIÓN CONJUNTA PARA SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO" del cual el Ing. José Benavides, está encargado, en la coordinación del proyecto en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.

Por la atención que se le preste a la presente le anticipo mis más sinceros agradecimientos.


Ing. Michael Valdezo
Director del AEIRNNR


Ing. Francisco Alsega
Coordinador de la CIEA


Ing. José Benavides
Docente de la CIEA


Jaime Vallejo F
Pasantista

Universidad de Talca.
Ciudad.-

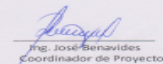
De mis consideraciones:

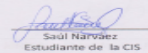
Yo Saúl Andrés Narváz Guillén estudiante de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA EN EL AREA DE LA ENERGIA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES, con número de cédula 1105589251, pongo a su conocimiento que estoy cumpliendo pasantías en el proyecto titulado "MACROLABORATORIO DE FORMACIÓN CONJUNTA PARA SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO" del Ing. José Leonardo Benavides, está encargado, en la coordinación del proyecto en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.

Por la atención que se le preste a la presente le anticipo mis más sinceros agradecimientos.



Ing. Michael Valdezo
Director del AEIRNNR



Ing. Hernán Torres
Coordinador de la CIS

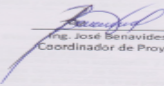

Ing. José Benavides
Coordinador de Proyecto

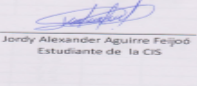

Saúl Narváz
Estudiante de la CIS

Universidad de Talca.
 Ciudad.-
 De mis consideraciones:
 Yo Jordy Alexander Aguirre Feijóo estudiante de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA EN EL AREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES, con número de cédula 1105151185, pongo a su conocimiento que estoy cumpliendo pasantías en el proyecto titulado "MACROLABORATORIO DE FORMACIÓN CONJUNTA PARA SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO" del Ing. José Leonardo Benavides, está encargado, en la coordinación del proyecto en la UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.
 Por la atención que se le preste a la presente le anticipo mis más sinceros agradecimientos.


 Ing. Michael Valarezo
 Director del AEIRNNR


 Ing. Heribán Torres
 Coordinador de la CIS


 Ing. José Benavides
 Coordinador de Proyecto


 Jordy Alexander Aguirre Feijóo
 Estudiante de la CIS

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS
DECANATO

Oficio Nro. EPN-FCD-2017-0049-O
 Quito, 14 de marzo de 2017

Asunto: Prácticas Preprofesionales

Magister
 Jimmy Stalin Paladines
 Decano (E) de la facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
 Presente.-

Reciba un cordial saludo de quienes hacemos la Facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica Nacional.

El presente tiene como finalidad solicitar a usted se den facilidades para efectuar una práctica pre-profesional, en la prestigiosa Institución a su digno cargo, al señor *Gallardo Vera Pedro Xavier*, con cédula de ciudadanía *1103530786*, estudiante del séptimo nivel referencial de la carrera de *Matemáticas*.


De acuerdo con la reglamentación interna de la EPN, los estudiantes requieren realizar un mínimo de *480 horas* de prácticas pre profesionales. Además, para cumplir con lo establecido en el reglamento de régimen académico (Art 94, literal 4) es necesario que se firme una carta de compromiso entre las dos Instituciones.

De tener una respuesta positiva a nuestro requerimiento le solicito, muy respetuosamente, enviar dicha respuesta por escrito.

Por su atención y ayuda, le anticipamos nuestros agradecimientos.

Atentamente,

 Ph.D. Luis Rodrigo Lascano Lascano
 DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS





ANEXO D:

En la Tabla D.1 se presenta el sílabo aprobado en el 2017 de la CIE de la materia de control automático, el cual consta de 8 unidades.

Tabla D.1 Sílabo de la CIE, aprobado en el 2017.

UNIDAD/TEMA	NRO. HORAS	CONTENIDOS TEÓRICOS (SUBTEMAS/CONTENIDOS)	NRO. HORAS	ACTIVIDADES PRÁCTICAS (HABILIDADES A DESARROLLAR EN LA ASIGNATURA)	NRO. HORAS	ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE AUTÓNOMO	NRO. HORAS	ESTRATEGIAS DE EVALUACIÓN
INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL.	4	Introducción. Concepto de sistema. Concepto de bloque. Diagramas de bloques. Función de transferencia o transmitancia. Sistema controlado. Control en lazo abierto. Control en lazo cerrado. Cambios de carga y perturbaciones. Realimentación.	2	Laboratorio Virtual	2	Lectura 1. Introducción a los sistemas de control.	4	Preguntas de Control.
HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CONTROL.	16	Transformada de Laplace. Propiedades y teoremas de la transformada de Laplace. Transformada inversa de Laplace. Solución de ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo. Solución de problemas de aplicación. Aplicación de herramientas informáticas para Control. Introducción a MATLAB®. Introducción a LabVIEW.	8	Laboratorio Virtual	8	Tarea T1: Solución de prácticas y problemas propuestos.	16	Examen E1:
MODELADO MATEMÁTICO DE SISTEMAS DINÁMICOS	20	Introducción. Función de transferencia. Diagramas de bloques. Álgebra de Bloques. Gráficas de flujo de señales. Modelado en el espacio de estado Solución de problemas de aplicación.	10		10	Tarea T2: Solución de problemas propuestos.	20	Examen E2:

MODELADO MATEMÁTICO SISTEMAS MECÁNICOS Y SISTEMAS ELÉCTRICOS	12	Modelado matemático de sistemas mecánicos. Modelado matemático de sistemas eléctricos. Solución de problemas de aplicación.	6	Laboratorio Virtual	6	Tarea T3: Solución de problemas propuestos.	12	Tareas Informes, consultas Exposiciones. Trabajos grupales e individuales. Lecciones. Participación en Clases.
MODELADO MATEMÁTICO SISTEMAS DE FLUIDOS Y SISTEMAS TÉRMICOS.	8	Sistemas de nivel de líquidos. Sistemas neumáticos. Sistemas	4	Laboratorio Virtual	4	Tarea T4: Solución de problemas propuestos.	8	Examen E3:
ANÁLISIS DE RESPUESTA TRANSITORIA Y ESTACIONARIA	16	Sistemas de primer orden. Sistemas de segundo orden. Sistemas de orden superior. Criterio de estabilidad de Routh. Error en estado estacionario. Solución de problemas de aplicación	8	Laboratorio Virtual	8	Tarea T5: Resolver problemas propuestos en clases	6	Examen E4:
LA TÉCNICA DEL LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES	16	Gráficas del lugar de las raíces. Reglas generales para construir los lugares de las raíces. Sistemas con realimentación positiva. Sistemas estables. Sistemas con retardo de transporte. Diseño de sistemas de control mediante la técnica del lugar geométrico de las raíces. Compensación de adelanto. Compensación de retardo. Compensación de retardo-adelanto. Compensación paralela. Solución de problemas de aplicación.	8	Laboratorio Virtual	8		16	

DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL	36	Diseño con el controlador PD. Diseño con el controlador PI. Diseño con el controlador PID. Reglas de sintonía de controladores PID.	18	Laboratorio Virtual	18		36	
TOTAL, DE HORAS	128		62		62		128	

Fuente: CIE.

ANEXO D.1:

En la Figura D.1.1, se presenta el programa académico de la CIE aprobado en el 2017, la malla completa se puede descargar de la dirección electrónica: www.unl.edu.ec/FEIRNNR.

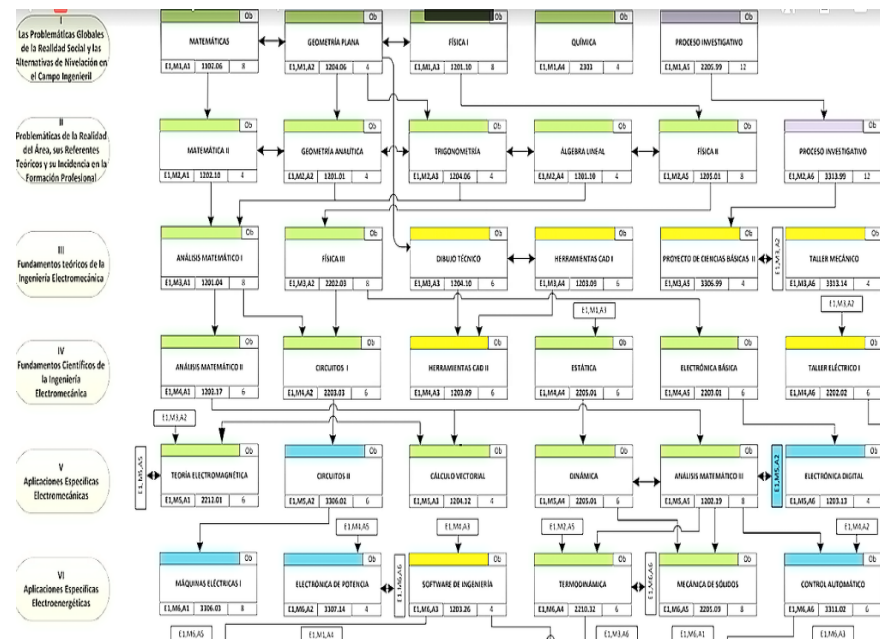


Figura D.1.1 Malla curricular de la CIE, donde se aprecia la materia de Control Automático en el VI ciclo que es definido como Aplicaciones Específicas Electroenergéticas, Fuente: CIE.

ANEXO D.2:

Guía de prácticas que sirvieron de modelo para el desarrollo de las prácticas de prototipo de trituración (*en total son seis prácticas*) y de la columna de destilación binaria (*en total son cinco prácticas*), de las cuales se muestran en las Figuras D.2.1 y D.2.2, respectivamente, una muestra de cada uno de estos procesos, la totalidad de prácticas se las puede observar en el sitio web: <https://mfc.unl.edu.ec/>, del MacroLaboratorio de Formación Conjunta.

The figure shows three pages of a practical guide. The first page is the title page, the second is the introduction and objectives, and the third is the materials and equipment list.

Page 1: Title Page

UNL
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
Fábrica de Control Automático de una Trituradora tipo mandíbula

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

CARRERA INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

GUÍA DE PRÁCTICAS DEL MACROLABORATORIO DE FORMACIÓN CONJUNTA: DE UNA TRITURADORA TIPO MANDÍBULAS

Elaborado por: Ing. José Leonardo Bermejo Velasco MSc. IC

Page 2: Introduction and Objectives

UNL
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
Fábrica de Control Automático de una Trituradora tipo mandíbula

PRÁCTICA #1
ASIGNATURA: CONTROL AUTOMÁTICO DEL PROTOTIPO DE TRITURACIÓN DESARROLLADO EN LA UNL.

RESULTADO DE APRENDIZAJE DE LA PRÁCTICA:

- Interpretar los conceptos fundamentales del Control Automático y sus aplicaciones básicas.
- Reconocer los componentes básicos de una trituradora, separando desde los tipos de mandíbula existentes.
- Selección del modelo de trituradora tipo mandíbula.
- Presentación de trabajo, en forma, valores en los que trabajen los sensores y actuadores de una trituradora.
- Pruebas: Montar de trabajo: grupo, sesiones de inducción, teoría, sesiones de presentación y defensa de proyectos e informes técnicos.

TIEMPO PLANIFICADO: 1 HORAS
NÚMERO DE ESTUDIANTES POR GRUPO: 1 ESTUDIANTES

1. TEMA
CONOCER EL FUNCIONAMIENTO Y CONTROL DEL PROTOTIPO DE TRITURACIÓN DESARROLLADO EN LA UNL.

2. OBJETIVOS

- Familiarizar con el entorno de las trituradoras, en aplicaciones como en la minería de cobre.
- Conocer los materiales e instrumentación con la que trabajan estos procesos.
- Desarrollar destrezas y habilidades en el uso de esta instrumentación.

Elaborado por: Ing. José Leonardo Bermejo Velasco MSc. IC

Page 3: Materials and Equipment List

UNL
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
Fábrica de Control Automático de una Trituradora tipo mandíbula

MATERIALES Y REACTIVOS - Por Grupo	EQUIPOS Y HERRAMIENTAS - Por Grupo
<ul style="list-style-type: none"> Subestaciones acerca del proceso. Diagramas del funcionamiento de trituradora tipo mandíbula. Artículos de Publicaciones científicas. Manual de usuario del funcionamiento de trituradora tipo mandíbula. 	<ul style="list-style-type: none"> Portátil o PC de escritorio. Conexión a Internet.

3. INTRODUCCIONES

- Se establece de una de las carreras de la UNL, que está cursando la materia de Control Automático.
- Seguir la primera práctica del curso.
- Leer el manual de Usuario del banco.

4. ACTIVIDADES A DESARROLLAR

- Leer el manual de usuario del banco.
- Revisar el diagrama de conexión montado en el manual de Usuario del banco de la columna de destilación binaria.
- Crear un nuevo proyecto en el software mencionado PRÁCTICA_1.
- Realizar la práctica que se ha desarrollado:
 - Antes de registrar el pago o el acceso solo, de acceso, a como se haya quedado con el docente.
 - Seguir a conectar la parte de preguntas que está al final de la práctica.
 - Cuando el estudiante haya finalizado la práctica, debe socializar con sus compañeros, para regularmente.
 - Guardar el proyecto y finalizar la práctica.

Elaborado por: Ing. José Leonardo Bermejo Velasco MSc. IC

Figura D.2.1 Modelo de guía de práctica de la trituradora, Fuente: Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES

CARRERA INGENIERÍA
ELECTROMEQUÍCA

GUÍA DE PRÁCTICAS DEL
MACROLABORATORIO DE
FORMACIÓN CONJUNTA: DE
LA COLUMNA DE
DESTILACIÓN BINARIA

Elaborado por: Ing. José Leonardo Bermejo Maldonado Mg. Sc.

UNL
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

Prácticas de Control Automático de la Columna de destilación Binaria

PRÁCTICA #1

ABRUMATURA, CONTROL AUTOMÁTICO DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN BINARIA.

RESULTADO DE APRENDIZAJE DE LA PRÁCTICA:

- Interpretar los conceptos fundamentales del Control Automático y sus aplicaciones básicas.
- Reconocer los componentes básicos de una columna de destilación, explicando desde los tipos de mezclas con las que puede funcionar correctamente.
- Parametrar de trabajo, es decir, valores en los que debe trabajar los sensores y actuadores en una columna de destilación.
- Practicar técnicas de trabajo grupal, normas de redacción técnica, normas de presentación y defensa de proyectos e informes técnicos.

TIEMPO PLANIFICADO: 3 HORAS

NÚMERO DE ESTUDIANTES POR GRUPO: 3 ESTUDIANTES

1. TEMA
CONocer EL FUNCIONAMIENTO Y CONTROL DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN BINARIA.

2. OBJETIVOS

- Familiarizarse con el entorno de trabajo de las columnas de destilación Binaria.
- Conocer los materiales e instrumentación con la que trabaja este proceso.
- Desarrollar destrezas y habilidades en el uso de esta instrumentación.

Elaborado por: Ing. José Leonardo Bermejo Maldonado Mg. Sc.

UNL
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

Prácticas de Control Automático de la Columna de destilación Binaria

MATERIALES Y REACTIVOS - Por Grupo	EQUIPOS Y HERRAMIENTAS - Por Grupo
<ul style="list-style-type: none"> • Información acerca del proceso • Diagramas del funcionamiento de columnas de destilación • Artículos de Publicaciones científicas. • Manual de usuario del funcionamiento de las columnas de destilación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fómido o PC de escritorio • Conexión a Internet

3. INSTRUCCIONES

- Se realizará de una de las carreras de la UNL, que estén cursando la materia de Control Automático.
- Registre la presencia práctica del curso
- Lea el manual de Usuario del banco.

4. ACTIVIDADES A DESARROLLAR

- a. Leer el manual de usuario del banco
- b. Revisar el diagrama de conexión mostrado en el manual de Usuario del banco de la columna de destilación binaria.
- c. Como un nuevo proyecto en el software modelado PRÁCTICA_1.

d. Realizar la práctica que se desarrolló:

- Luego de reunirse el grupo o el alumno solo, de acuerdo, a como se haya quedado con el docente.
- Se procede a comentar la parte de preguntas que están al final de la práctica.
- Cuando el estudiante haya finalizado la práctica, debe socializar con sus compañeros, para el aprendizaje.
- Cerrar el proyecto y finalizar la práctica.

5. MARCO TEÓRICO (a elaborar por el estudiante)

6. RESULTADOS OBTENIDOS (a elaborar por el estudiante)

Elaborado por: Ing. José Leonardo Bermejo Maldonado Mg. Sc.

Figura D.2.2 Modelo de guía de práctica de la columna de destilación binaria, Fuente: Autor

ANEXO E:

En este anexo se presenta la metodología empleada para el desarrollo de la práctica en tiempo virtual de una columna de destilación binaria, pero antes a más de la teoría presentada en el capítulo I. A continuación, se mencionan tres experiencias que se dan en universidades sobre todo porque sirvieron para la selección adecuada de instrumentación, ya que como se muestra en la Figura. E.1 este tema de tesis fue parte de un proyecto que tenía que ver con la construcción de una columna de destilación binaria por platos.



Figura E.1 Carta aval de director del proyecto para el Diseño y Construcción de una Columna de destilación por parte del autor de esta tesis.

Estas tres experiencias son para una mezcla binaria, por ejemplo, para la obtención de vino y son las siguientes:

- En el artículo de (Huick, K., De Branbanter, F., Logist, F., De Branbanter, J., Imper, V., & De Moor. 2011), se describe la identificación de una columna de destilación binaria empleando el método de Mínimos Cuadrados para máquinas de Soporte Vectorial, Least Squares Support Vector Machines (LS-SVM), los actuadores y sensores son conectados a un Compact Field Point (National Instruments, Austin), con una interfaz controlada con cFP-2100 y módulos de E/S cFP-AIO-610 y cFP-AI-110. El programa desarrollado para el control de los actuadores y el registro, es LabVIEW™ (National Instruments, Austin).
- Así también, en la Universidad Pontificia Católica de Chile, específicamente en la facultad de Química se ha desarrollado un equipo construido en acero inoxidable con capacidad de 50 L, que posee dos calefactores sumergidos en el hervidor (de 2000 W cada uno) y una bomba peristáltica para regular el flujo de refrigerante para el condensador parcial. Está seccionada en 5 partes, en orden ascendente: estanque hervidor, columna empacada, condensador parcial, recolector de destilado y condensador total.

La instrumentación está dada por 8 Pt-100, 1 sensor de densidad, 2 sensores de flujo (condensador parcial y destilado) y 1 sensor de potencia. Las señales son adquiridas y emitidas desde un notebook con el programa LabView™ mediante los módulos de National Instruments™. El sistema de destilación está instalado en una estructura de aluminio más planchas de melamina y acrílico, la dimensión de todo el sistema es 780x1700x1978 mm, tal como se muestra en la Figura E.2.

- Finalmente, en Ecuador en la Universidad Politécnica Nacional, se pueden encontrar en la Facultad de Química en la carrera de Ingeniería en Petróleos varios tipos de columnas, entre ellas la que se rescata es la que se emplea en este trabajo, como es la columna de destilación por platos.

El sistema esta automatizado con SIEMENS, y su SCADA es TIA portal V12. Este destilador es continuo, aunque normalmente son del tipo Batch, porque el sistema va cambiando en el tiempo, al principio se tiene un medio con una alta concentración de producto.

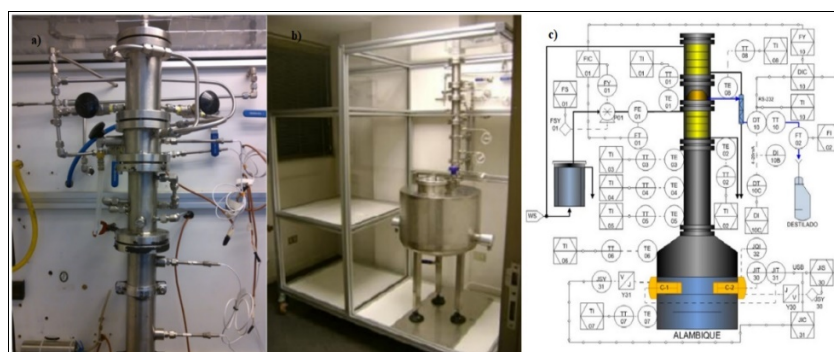


Figura E.2 En las fotografías a y b se muestran una columna de destilación de tres platos, con las respectivas Pt-100 en cada plato, además a la derecha se muestra parte del programa realizado para la adquisición y control de algunos parámetros de esta columna, Fuente: Autor.

Seguidamente, se plantean los tres momentos de la práctica en tiempo virtual:

E.1 Momento Inicial

Una vez que se tiene los componentes teóricos de la práctica a realizar, así, como de los materiales y equipos a utilizar, el estudiante procede a familiarizarse con la arquitectura de trabajo, misma que se presenta a continuación.

E.1.1 Arquitectura de la práctica de la Columna de Destilación Binaria, en tiempo virtual

El desarrollo de la práctica de la Columna de Destilación Binaria, es para un tiempo virtual o simulado y emplea la arquitectura basada en control supervisado a través del protocolo HTTPS, porque usa la comunicación en Internet, la cual se hace con protocolos HTTPS, el intercambio entre el servidor principal y el cliente, se lo hace mediante HTTPS, los datos son codificados en cadenas URL e incluyen información referente al usuario, contraseñas y las órdenes de alto nivel para ser ejecutadas, este protocolo es inspirado en el paradigma solicitud-respuesta, el sistema remoto se hace igual que la página web, evitando problemas con el cortafuegos, firewalls, esto se observa en la Figura E.3.

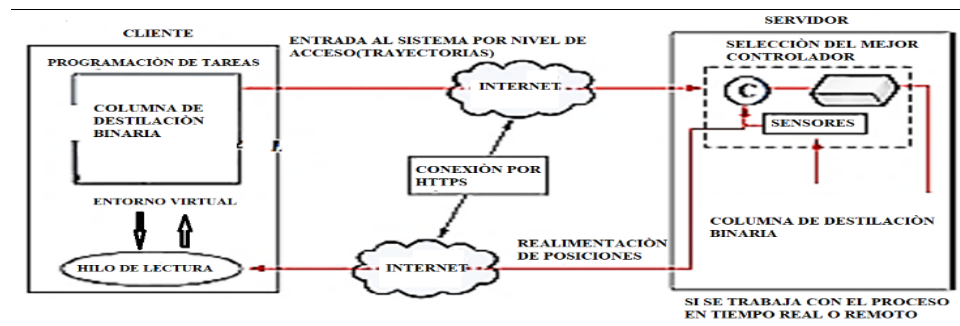


Figura E.3 Arquitectura basada en control supervisado a través del protocolo HTTPS: Fuente: (Vargas, H., Sánchez, J., Jara., Candelas, C., Reinoso, O., & Diez, 2010).

E.2 Momento de Desarrollo de la práctica, empleando un dibujo realizado en SolidWorks

En este momento al estudiante tiene acceso a los planos realizados en SolidWorks e importados al ambiente MATLAB®/Simulink, se sigue usando la herramienta Moodle

para diseñar los ambientes educativos, en este caso el relacionado con la destilación de una mezcla binaria.

Así mismo, como en el caso de la trituradora, en este proceso se hizo lo mismo con la finalidad de realizar una animación en 3D, lo más parecida al sistema real, que le permita al estudiante controlar este proceso, al adicionar los algoritmos de control que mejores resultados hayan alcanzados. Estas prácticas se realizan en la plataforma Moodle de forma más interactiva con la ayuda de la animación del proceso, tal como se muestra en la Figura E.4, donde se puede apreciar una captura de pantalla de la columna de destilación binaria.

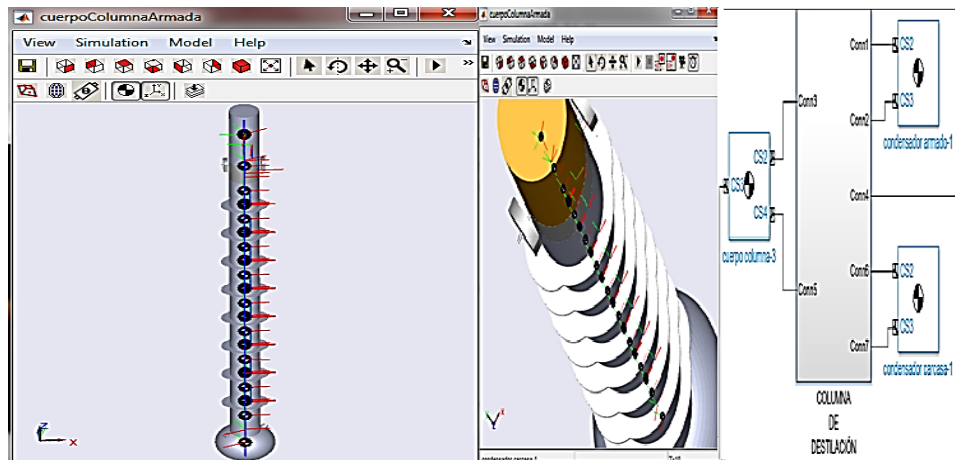


Figura E.4 Captura de imagen de la pantalla de la CDB, Fuente: Autor.

E.2.1 Diseño de una práctica, usando Moodle y datos de un evento IFAC

Se le da al estudiante información de un proceso similar y se considera para esto, datos de un evento IFAC en el espacio de estados y se simula su comportamiento con la ayuda de MATLAB®. Esta práctica se habilitó desde la plataforma de la UNL, lo que hace principalmente es cerrar el lazo de control con los algoritmos existentes en el MATLAB® y así reforzar el

conocimiento de los estudiantes en un ambiente conocido por los estudiantes.

E.2.2 Planteamiento del problema a estudiar

La columna de destilación que se estudiará posee 8 platos, una única etapa de alimentación, un condensador y un rehervidor. Los datos que se utilizarán están en el espacio de estados y se podrá apreciar en el siguiente capítulo, que tratan acerca de sistemas de control automático y una metodología de trabajo para las prácticas de: trituración y de la columna de destilación binaria. El siguiente ejemplo describe un problema bastante realista de una torre de destilación binaria, y tiene la característica de que la variación de presión está incluida en la descripción del modelo. En la Figura E.5, se muestra una representación de la columna de destilación a controlar.

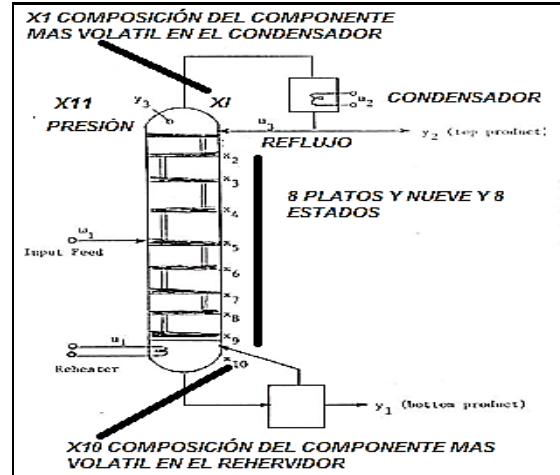


Figura E.5 Columna de destilación binaria con variación de presión, Fuente: (Davison, 1967).

Para realizar el control se debe partir de las ecuaciones del modelo, para una columna de destilación con n platos, dados por las ecuaciones (16), (17), (18). (Davison, 1967) se toman

estas ecuaciones, las que permiten obtener la linealización de un modelo para una columna que contiene 8 platos.

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \quad (16)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (17)$$

$$ym(t) = x(t) \quad (18)$$

Donde la entrada es el vector u , es, $u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$ que tiene tres componentes que son las siguientes:

u_1 = Temperatura del valor rehervido, en la parte inferior de la torre

u_2 = Temperatura del refrigerante en el Condensado

u_3 = Controlador de reflujo en la parte superior

El vector de salida y tiene los siguientes componentes:

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}, \text{ es decir, se tiene 3 variables de salida}$$

A continuación, se indica en la Tabla E.1 lo que representa cada variable de salida, así como las de los espacios intermedios.

Tabla E.1 Definición de algunos de los parámetros, usados en espacio de estado.

$y_1 =$	Composición del componente más volátil en el fondo de la torre.
$y_2 =$	Composición del componente más volátil en el tope o parte superior de la torre.
$y_3 =$	Presión en la parte superior de la torre.
<i>Estados Intermedios de Transición.</i>	
$x_1 =$	Composición del componente más volátil en el condensador.
$x_2 =$	Composición del componente más volátil en el plato #1.
$x_9 =$	Composición del componente más volátil en el plato #8.
$x_{10} =$	Composición del componente más volátil en el calderín.
$x_{11} =$	Presión.
$w_1 =$	Cambio del alimento de concentración en la entrada.
$y_m =$	Salida del sistema que podría ser medida.

Fuente:(Davison, 1967).

Este diseño está sujeto a controlar o regular 3 salidas y_1, y_2, y_3 , contra los disturbios no medibles w_1 , y otros no medibles, con una respuesta rápida y deseada, considerando las siguientes limitaciones: $|u_2| \leq 2.5$.

Para los 3 casos: $t \geq 0$; $|u_3| \leq 0.30$.

Para $|w_1| \leq 1$ y $t \geq 0$. En este problema se escoge la salida medible a usarse en el controlador y debe ser considerada a ser parte de la declaración del problema. En general un controlador que usa el menor número de salidas medibles es deseable (Davison, 1967).

E.2.3 Sistema de Control Automático y metodología de trabajo para la práctica de mezclas de destilación binarias

Seguidamente para el diseño del controlador se plantean dos estrategias las cuales son: El controlador LQR (Regulador Lineal Cuadrático) y el controlador basado en Lógica Difusa.

E.2.3.1 Control de un motor de corriente directa (CD) basado en Lógica Difusa

Para el diseño de este tipo de controlador, se parte de calcular las nueve funciones de transferencia, es decir, los datos se encuentran en espacio de estado, ver los artículos presentados por (Benavides, L., Paz, H., Alvarado, F., & Cuenca, 2016), (Paz, H., Benavides, L., Castillo, H., & Anchundia, 2016), donde se explica más en detalle el objetivo de hacer este procedimiento.

E.2.3.2 Cálculo de las funciones de transferencia

Como cada entrada se relaciona con tres salidas, se obtienen 9 funciones de transferencia, que son representadas a través de un control desacoplado del sistema multivariable.

Seguidamente se presentan las 9 funciones de transferencia que resultan de combinar las tres entradas con las tres salidas:

Para esto se hace uso del siguiente programa desarrollado en MATLAB®.

```
A= [-0.0140      0.0043      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0.0095   -0.0138      0.0046      0 0 0 0 0 0 0
0 0.0005;
0 0.0095   -0.0141      0.0063      0 0 0 0 0 0
0.0002;
0 0 0.0095   -0.0158      0.0110      0 0 0 0 0
0;
0 0 0 0.0095   -0.0031      0.0150      0 0 0 0
0;
0 0 0 0 0.0220   -0.0350      0.0220      0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0.0202   -0.0422      0.0280      0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0.0202   -0.0482      0.0370      0
0.0002;
0 0 0 0 0 0 0 0.0202   -0.0572      0.0420      0.0005;
0 0 0 0 0 0 0 0 0.0202   -0.0483      0.0005;
0.0255 0 0 0 0 0 0 0 0.0255 -0.0185];

B= [0 0 0; 5.0000e-06 -4.0000e-05 2.5000e-03; 2.0000e-06 -
2.0000e-05 5.0000e-03; 1.0000e-06 -1.0000e-05 5.0000e-03;
0 0 5.0000e-03; 0 0 5.0000e-03; -5.0000e-06 1.0000e-05
5.0000e-03; -1.0000e-05 3.0000e-05 5.0000e-03];
```

```
-4.0000e-05 5.0000e-06 2.5000e-03; -2.0000e-05 2.0000e-
06 2.5000e-03; 4.6000e-04 4.6000e-04 0]
```

```
C = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0; 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1];
```

```
% Los valores de la matriz D, no da el ejercicio por tal motivo
se los asume como 0
```

```
D = zeros (3,3);
```

```
[num1, den]=ss2tf (A, B, C, D, 1)
```

```
[num2, den] =ss2tf (A, B, C, D, 2)
```

```
[num3, den] =ss2tf (A, B, C, D, 3)
```

```
%Para la primera entrada
```

```
h11=tf(num1(1, :),den); h21=tf(num1(2,:),den);
h31=tf(num1(3,:),den)
```

```
%Para la segunda entrada
```

```
h12=tf(num2(1, :),den); h22=tf(num2(2,:),den);
h32=tf(num2(3,:),den)
```

```
%Para la tercera entrada
```

```
h13=tf(num3(1, :),den); h23=tf(num3(2,:),den);
h33=tf(num3(3,:),den)
```

```
%printsys(num,den); %[num,den]=ss2tf(A,B,C,D,2);
%printsys(num,den; %[num,den]=ss2tf(A,B,C,D,3);
%printsys(num,den)
```

Con lo que se obtiene 9 funciones de transferencia, seguidamente se presenta el resultado de combinar la primera variable de entrada con las tres salidas:

h11 = Temperatura en el rehervidor / Composición en el fondo

$$\frac{-2e^{-05} s^{10} - 5.816e^{-06} s^9 - 6.502e^{-07} s^8 - 3.617e^{-08} s^7 - 1.072e^{-09} s^6 - 1.597e^{-11} s^5 - 6.415e^{-14} s^4 + 1.368e^{-15} s^3 + 2.057e^{-17} s^2 + 1.063e^{-19} s + 1.897e^{-22}}{s^{11} + 0.3102 s^{10} + 0.03885 s^9 + 0.002559 s^8 + 9.612e^{-05} s^7 + 2.04e^{-06} s^6 + 2.08e^{-08} s^5 - 2.07e^{-11} s^4 - 2.86e^{-12} s^3 - 2.776e^{-14} s^2 - 1.089e^{-16} s - 1.491e^{-19}}$$

h12 = Temperatura en el rehervidor / Composición en el tope

$$\frac{2.15e^{-08} s^9 + 7.1e^{-09} s^8 + 9.36e^{-10} s^7 + 6.29e^{-11} s^6 + 2.24e^{-12} s^5 + 3.861e^{-14} s^4 + 1.452e^{-16} s^3 - 4.189e^{-18} s^2 - 4.99e^{-20} s - 1.49e^{-22}}{s^{11} + 0.310 s^{10} + 0.038 s^9 + 0.0025 s^8 + 9.61e^{-05} s^7 + 2.04e^{-06} s^6 + 2.08e^{-08} s^5 - 2.07e^{-11} s^4 - 2.816e^{-12} s^3 - 2.776e^{-14} s^2 - 1.089e^{-16} s - 1.491e^{-19}}$$

h13 = Temperatura en el rehervidor / Presión en el tope

$$\frac{0.00046 s^{10} + 0.000133 s^9 + 1.525e^{-05} s^8 + 8.78e^{-07} s^7 + 2.7e^{-08} s^6 + 4.14e^{-10} s^5 + 1.55e^{-12} s^4 - 3.96e^{-14} s^3 - 5.362e^{-16} s^2 - 2.433e^{-18} s - 3.65e^{-21}}{s^{11} + 0.310 s^{10} + 0.038 s^9 + 0.0025 s^8 + 9.61e^{-05} s^7 + 2.04e^{-06} s^6 + 2.08e^{-08} s^5 - 2.07e^{-11} s^4 - 2.816e^{-12} s^3 - 2.776e^{-14} s^2 - 1.089e^{-16} s - 1.491e^{-19}}$$

$$s^{11} + 0.31 s^{10} + 0.038 s^9 + 0.002559 s^8 + 9.6e^{-05} s^7 + 2.04e^{-06} s^6 + 2.08e^{-08} s^5 - 2.07e^{-11} s^4 - 2.86e^{-12} s^3 - 2.776e^{-14} s^2 - 1.089e^{-16} s - 1.491e^{-19}$$

Resultados de combinar la segunda variable de entrada con las tres salidas, obteniéndose de esta forma las siguientes funciones de transferencia:

h21 = Temperatura en el condensador / Composición en el fondo

$$\frac{2e^{-06} s^{10} + 8.54e^{-07} s^9 + 1.47e^{-07} s^8 + 1.257e^{-08} s^7 + 5.6e^{-10} s^6 + 1.306e^{-11} s^5 + 1.26e^{-13} s^4 - 4.608e^{-16} s^3 - 1.986e^{-17} s^2 - 1.408e^{-19} s - 2.929e^{-22}}{s^{11} + 0.3102 s^{10} + 0.03885 s^9 + 0.002559 s^8 + 9.612e^{-05} s^7 + 2.045e^{-06} s^6 + 2.08e^{-08} s^5 - 2.072e^{-11} s^4 - 2.816e^{-12} s^3 - 2.776e^{-14} s^2 - 1.089e^{-16} s - 1.491e^{-19}}$$

h22 = Temperatura en el condensador / Composición en el tope

$$\frac{-1.72e^{-07} s^9 - 4.798e^{-08} s^8 - 5.158e^{-09} s^7 - 2.7e^{-10} s^6 - 7.298e^{-12} s^5 - 8.58e^{-14} s^4 + 7.49e^{-17} s^3 + 1.15e^{-17} s^2 + 9.682e^{-20} s + 2.565e^{-22}}{s^{11} + 0.3102 s^{10} + 0.03885 s^9 + 0.002559 s^8 + 9.612e^{-05} s^7 + 2.045e^{-06} s^6 + 2.08e^{-08} s^5 - 2.072e^{-11} s^4 - 2.816e^{-12} s^3 - 2.776e^{-14} s^2 - 1.089e^{-16} s - 1.491e^{-19}}$$

h23 = Temperatura en el condensador / Presión en el tope

$$\frac{0.0004 s^{10} + 0.000134 s^9 + 1.5e^{-05} s^8 + 8.945e^{-07} s^7 + 2.78e^{-08} s^6 + 4.328e^{-10} s^5 + 1.71e^{-12} s^4 - 4.012e^{-14} s^3 - 5.632e^{-16} s^2 - 2.566e^{-18} s - 3.757e^{-21}}{s^{11} + 0.3102 s^{10} + 0.03885 s^9 + 0.002559 s^8 + 9.612e^{-05} s^7 + 2.045e^{-06} s^6 + 2.08e^{-08} s^5 - 2.072e^{-11} s^4 - 2.816e^{-12} s^3 - 2.776e^{-14} s^2 - 1.089e^{-16} s - 1.491e^{-19}}$$

$$s^{11} + 0.310 s^{10} + 0.03885 s^9 + 0.002559 s^8 + 9.612e^{-05} s^7 + 2.045e^{-06} s^6 + 2.08e^{-08} s^5 - 2.072e^{-11} s^4 - 2.816e^{-12} s^3 - 2.776e^{-14} s^2 - 1.089e^{-16} s - 1.491e^{-19}$$

Resultados de combinar la tercera variable de entrada con las tres salidas, obteniéndose de esta forma las siguientes funciones de transferencia:

h31 = Reflujo / Composición en el fondo

$$0.0025 s^{10} + 0.00070 s^9 + 8.0e^{-05} s^8 + 4.745e^{-06} s^7 + 1.585e^{-07} s^6 + 2.92e^{-09} s^5 + 2.35e^{-11} s^4 - 7.795e^{-14} s^3 - 2.903e^{-15} s^2 - 1.821e^{-17} s - 3.149e^{-20}$$

$$s^{11} + 0.3102 s^{10} + 0.03885 s^9 + 0.002559 s^8 + 9.612e^{-05} s^7 + 2.045e^{-06} s^6 + 2.08e^{-08} s^5 - 2.072e^{-11} s^4 - 2.816e^{-12} s^3 - 2.776e^{-14} s^2 - 1.089e^{-16} s - 1.491e^{-19}$$

h32 = Reflujo / Composición en el Tope

$$1.0e^{-05} s^9 + 3.1e^{-06} s^8 + 3.59e^{-07} s^7 + 2.0e^{-08} s^6 + 6.46e^{-10} s^5 + 1e^{-11} s^4 + 4.1e^{-14} s^3 - 7.8e^{-16} s^2 - 9.445e^{-18} s - 2.445e^{-20}$$

$$s^{11} + 0.3102 s^{10} + 0.03885 s^9 + 0.002559 s^8 + 9.612e^{-05} s^7 + 2.045e^{-06} s^6 + 2.08e^{-08} s^5 - 2.072e^{-11} s^4 - 2.816e^{-12} s^3 - 2.776e^{-14} s^2 - 1.089e^{-16} s - 1.491e^{-19}$$

h33 = Reflujo / Presión en el Tope

$$6.375e^{-05} s^9 + 1.708e^{-05} s^8 + 1.80e^{-06} s^7 + 9.677e^{-08} s^6 + 2.78e^{-09} s^5 + 3.9e^{-11} s^4 + 1.249e^{-13} s^3 - 3.25e^{-15} s^2 - 3.395e^{-17} s - 7.711e^{-20}$$

$$s^{11} + 0.310 s^{10} + 0.03885 s^9 + 0.002559 s^8 + 9.61e^{-05} s^7 + 2.045e^{-06} s^6 + 2.08e^{-08} s^5 - 2.072e^{-11} s^4$$

E.2.4 Diseño del controlador basado en Lógica Difusa

Para el diseño del controlador se inicia con calcular los siguientes parámetros.

E.2.4.1 Variables lingüísticas

Seguidamente se regresa a la ventana principal para poner las reglas de control, definiendo las variables lingüísticas y en forma más compacta en términos que los va aceptar el controlador, tal como se muestra en la Tabla E.2.

Tabla E.2 Variables Lingüísticas y Reglas de control difuso PID

<i>Términos Lingüísticos</i>		<i>Reglas de Control Difuso</i>	
<i>Para el error</i>	<i>Para la posición</i>	<i>Error</i>	<i>Voltaje</i>
1.- Si el error es "neg-grande".	1.- El giro o revolución es "neg-grande".	ENG	GRNG
2.- Si el error es "neg-pequeño".	2.- El giro o revolución es "neg-pequeño".	ENP	GRNP
3.- Si el error es "cero".	3.- El giro o revolución es "cero".	EC	GRC
4.- Si el error es "pos-pequeño".	4.- El giro o revolución es "pos-pequeño".	EPP	VPP
5.- Si el error es "pos-grande".	5.- El giro o revolución es "pos-grande".	EPG	VPG

Fuente: Autor.

Seguidamente, con este diseño desarrollado se plantea un primer lazo de control que permite controlar la posición del motor de corriente directa con precisión, y así tener mando sobre la electroválvula que permitirá el paso de fluido, esto se puede apreciar en la Figura E.6, el modelo matemático que se ve en esta figura se tomó de (Bishop, R., & Dorf, 2008).

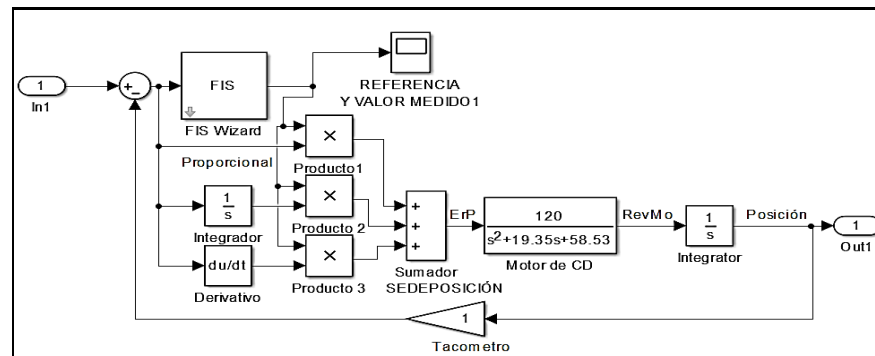


Figura E.6 Diagrama de bloques, desarrollado en MATLAB®/Simulink, Fuente: Autor.

El sistema de control que se muestra en la Figura E.7, consta de un subsistema para el control de la posición del motor de corriente directa, que a su vez permite con precisión la apertura y cierre de la electroválvula cuyo modelo matemático se calculó previamente.

La variable de salida del modelo de la electroválvula, es la temperatura en el rehervidor, que a su vez entra a un bloque sumador con otra variable y el resultado entra al bloque modelo de función de transferencia h_{11} . A la salida de este bloque se conoce la composición en el tope, de igual manera se calcula para las otras salidas que son: composición en el fondo y presión en el tope.

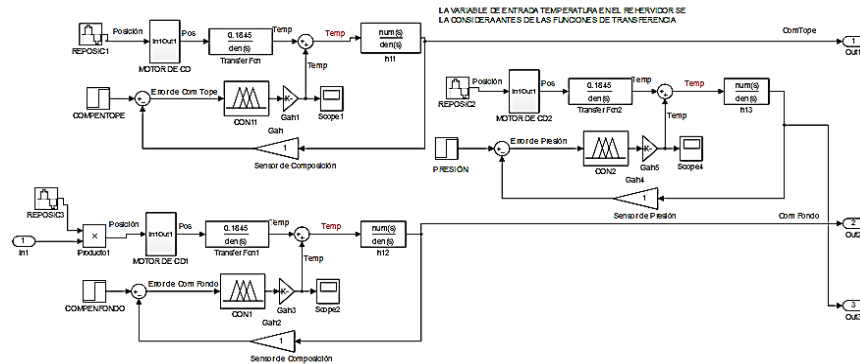


Figura E.7 Esquema para la simulación de la posición de las electroválvulas, empleando control Difuso, Fuente: Autor.

El sistema de bloques anterior se lo lleva a un subsistema en la que se puede ver la variable de entrada temperatura del rehervidor como interactúa con las 3 salidas: la composición en el tope, la composición en el fondo y la presión en el tope de la columna de destilación binaria. En este modelo hay que definir las variables de entrada y salida de manera de poder limitar los rangos o valores, de forma tal, que el controlador difuso diseñado realice los cambios en el proceso.

A continuación, en la Figura E.8, se presenta el diagrama de inferencia, por medio de las reglas difusas de las tres variables a controlar. Es importante señalar que se ha trabajado utilizando como método un controlador tipo Mamdani, con el que se va a controlar la columna de destilación binaria, la composición en el tope en un valor lo más próximo a uno, la composición en el fondo lo más aproximado a cero y la presión en la parte alta con un valor cercana a 1 atm.

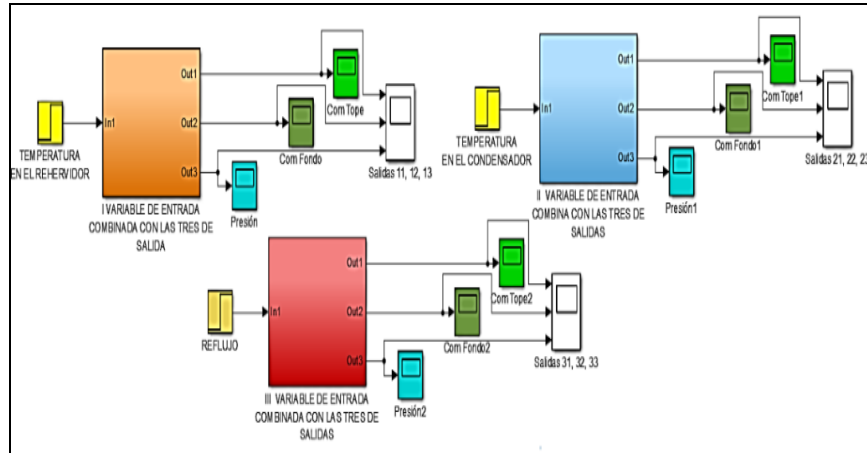


Figura E.8 Esquema completo del control construido en MATLAB®/Simulink, para la regulación de las tres variables de entrada y las tres de salida de la columna de destilación binaria, Fuente: Autor.

E.2.4.2 Funciones de pertenencia

En teoría es posible usar cualquier función que se encuentre en el intervalo de 0 y 1, en este trabajo se han adoptado las funciones de tipo trapezoidal y triangular. Para crear la base de conocimiento se definen las reglas del controlador relacionando la entrada y la salida con reglas del tipo IF, THEN. El controlador diseñado consta de 5 reglas que son el producto del comportamiento de las electroválvulas trabajando en el cierre del paso de fluido y que son las encargadas de actuar sobre los motores CD.

A continuación, las primeras funciones de pertenencia para la variable de entrada, error de posición, se muestran en la Figura E.9.

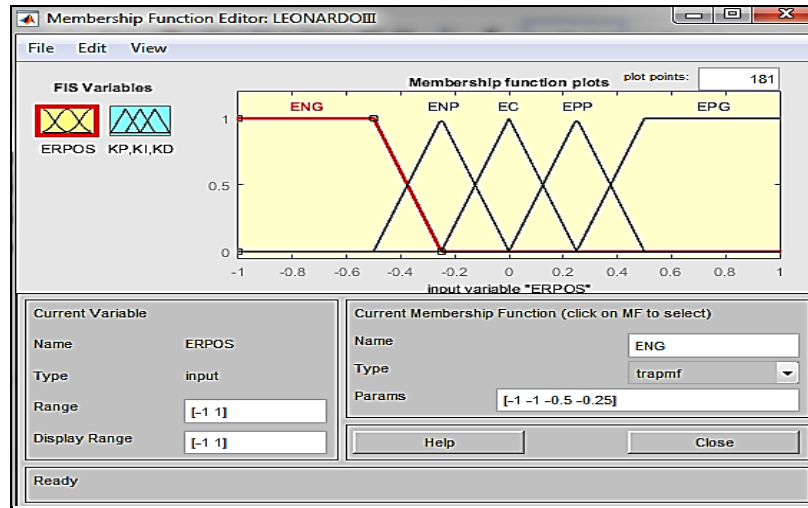


Figura E.9 Funciones de pertenencia de la variable entrada, denominada error de posición (el valor en el eje x corresponde al movimiento del motor de CD), Fuente: Autor

Las funciones de pertenencia para la variable de salida, revoluciones del motor que determinan la posición, se indican en la Figura E.10.

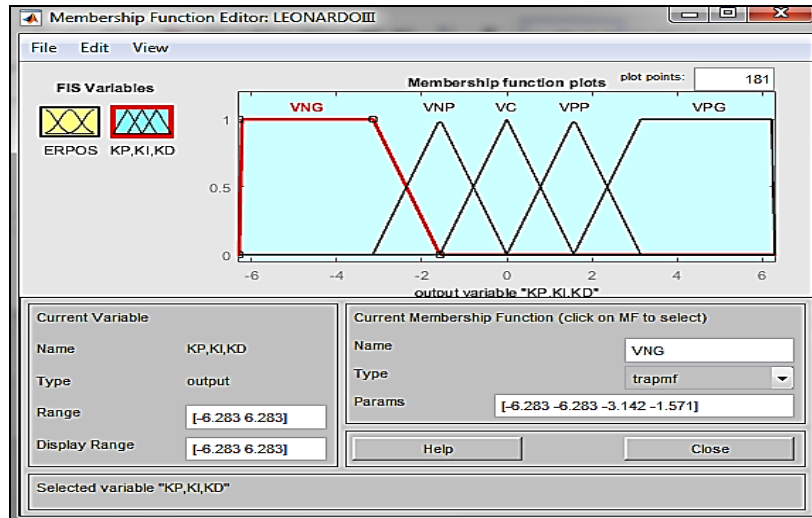


Figura E.10 Funciones de pertenencia de la variable de salida, denominada voltaje del motor, Fuente: Autor

El sistema se muestra en la Figura E.11 y consta de una entrada, una salida y de algunas de las operaciones como: y, o and, or, implicación, agregación y la defusificación, el método de inferencia que se va a usar es el de Mamdani, que surgió antes del Sugeno y que fue la primera aplicación práctica de la teoría difusa (Mamdani & Assilians, 1975).

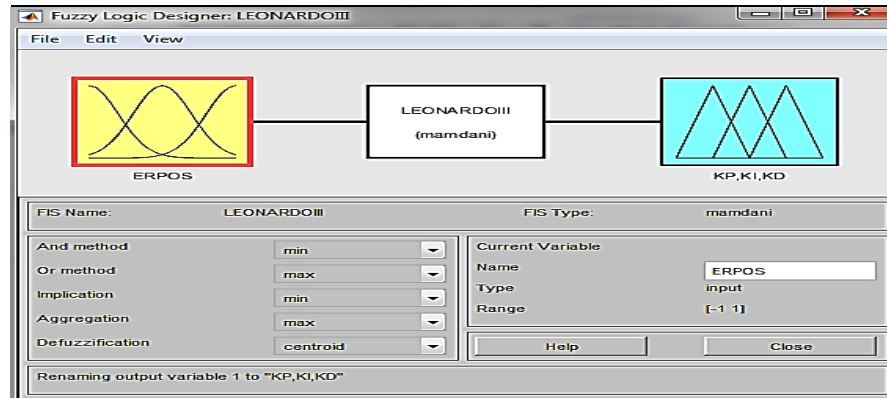


Figura E.11 En la parte superior se muestra el Modelo Difuso implementado con la herramienta *fuzzy* de MATLAB® para controlar el motor de CD, en la parte baja de esta misma figura se muestran algunas de las operaciones principales que se realizan con el controlador Mamdani, Fuente: Autor.

A continuación, en la Figura E.12, se indica la curva de salida del sistema correspondiente a las dos variables: la entrada versus la salida, donde se puede ver el error en todo el universo de discurso desde -4.8 a 4.8 y los valores en la variable de salida que generaría el controlador para cada uno de los valores del error, su integración se ha basado en la integración de conocimiento adquirido por docentes de la UNL.

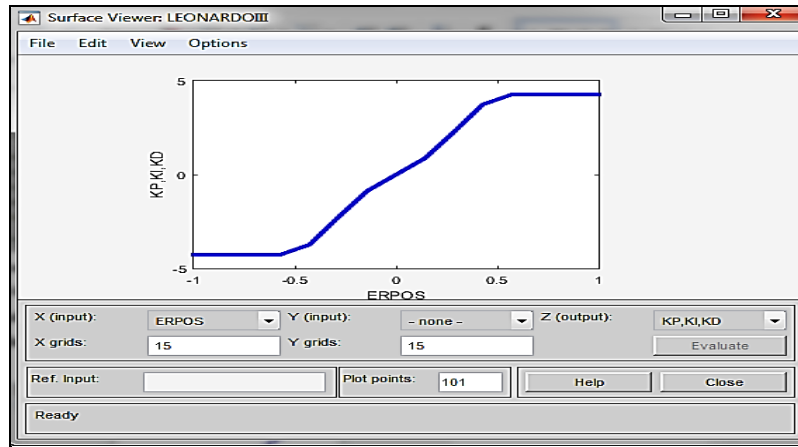


Figura E.12 Curva de entrada/salida del controlador difuso, Fuente: Autor

En la Figura E.13, se puede observar como con esta herramienta se visualiza las reglas de control, el valor que entra en el controlador se representa con una línea de color rojo, si se pone al inicio solo se activa la regla 1, a la derecha se ven los conjuntos cortados a la altura de los valores de defusificación debido a que, en las reglas de 1, 2, 3 el valor de fusificación es cero. Evaluando los valores de las reglas de membresía que son cero, entonces el corte es total a tal punto que los conjuntos consecuentes no se pintan de azul y una vez que los unen solamente queda las dos últimas reglas.

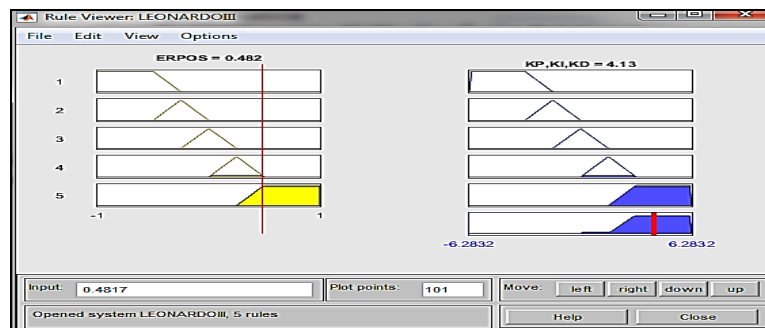


Figura E.13 Algunas de las operaciones principales que se realizan con el controlador Mamdani, Fuente: Autor

Si se mueve la raya roja se puede apreciar las cuatro operaciones que son fusificación, corte, unión y la defusificación en la parte baja de la segunda columna con una raya roja tal como se aprecia en la Figura E.14.

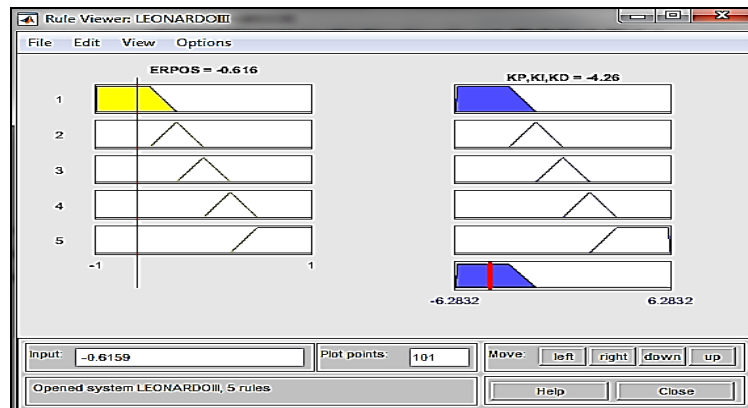


Figura E.14 Visualización de las cuatro operaciones básicas que se realizan con este controlador Mamdani, Fuente: Autor

Para el diseño del controlador a continuación se define tres conceptos que son necesarios explicar de manera de comprender por qué se estabiliza el proceso alrededor de ciertos parámetros.

La fracción molar del soluto se define como el cociente entre los moles de soluto y los moles totales, para la fracción molar se cumplen las mismas propiedades que para la másica: es adimensional, a de valer entre 0 y 1 y la fracción molar de todos los componentes de la disolución toman un valor de 1. Considerando lo anterior el soluto va a ser menor y lo más aproximado a cero, mientras que el soluto será lo más aproximado a uno. Finalmente, la presión alrededor de 1 atmosfera.

E.2.4.3 Resultados obtenidos con el Diseño del controlador del motor de CD de cada una de las electroválvulas

Este tipo de modelado lleva a cabo el control utilizando técnicas de lógica borrosa, debido a su capacidad para modelar el conocimiento humano (Mendel, 1995).

La ventaja de este tipo de control es que puede ser realizado a diferentes niveles. En el nivel inferior un controlador difuso puede realizar el control en bucle cerrado, de una determinada magnitud física del sistema, con el fin de mantenerla en torno a una referencia. Por otro lado, aplicado en los niveles superiores de planificación un controlador puede asegurar los niveles necesarios de almacenamiento, para mantener la producción prevista, con los mínimos costes y teniendo en cuenta los datos históricos (Del Brío & Sanz, 2007).

E.2.4.4 Aproximaciones que se deben considerar para implementar el Control Difuso en este tipo de columnas y de gran tamaño

Al analizar un trabajo realizado con anterioridad por el autor, que se expone al final del este documento, propone que se tengan en cuenta los siguientes criterios y valores en los parámetros de las variables involucradas en una torre de destilación. Si el modelo a utilizar cumple con estas especificaciones de análisis, es válido para ser tenido en cuenta, ya que están presentes en todos los sistemas industriales. El rebozo **equivocar**, es el hecho de que cada molécula que se condensa, evapora otra molécula y permite establecer características importantes:

E.2.4.5 Simulación del controlador difuso en MATLAB®/Simulink

Este sistema consiste en un controlador difuso, el cual fue diseñado en MATLAB® usando la caja de herramientas,

toolbox fuzzy® empezando por definir los términos lingüísticos para el error de posición y para el voltaje.

Para esto se parte de calcular las 9 funciones de transferencia que da el sistema en espacio de estado, luego al simular el sistema anterior para el primer grupo de variables que son: la temperatura en el rehervidor como entrada y como salida: la composición en el tope, la composición en el fondo y la presión en el tope de la columna de destilación binaria, se obtiene la Figura E.15, donde la presión llega al valor deseado de 1 atm.

La señal de referencia que se usó es del tipo paso, cuyos valores son: 1 atmosfera para la presión en la parte alta de la columna de destilación, la composición en el tope con un valor cercano a 1 y la composición en el fondo con un valor cercano a 0, respectivamente.

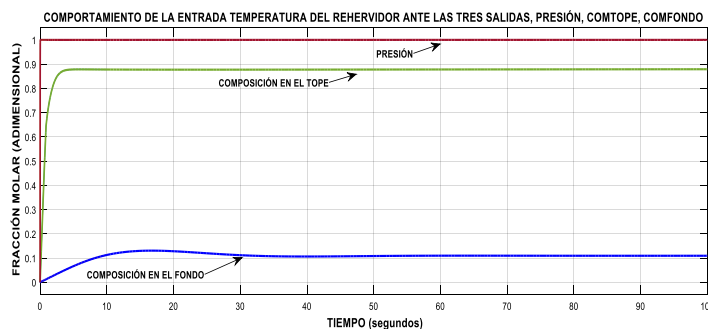


Figura E.15 Comportamiento de las tres salidas del sistema ante una señal de entrada escalón de 71, 6674° C, en el rehervidor, control mediante el controlador difuso desarrollado, Fuente: Autor.

El segundo grupo de variables que son: la temperatura en el condensador como entrada y como salidas: la composición en el tope, la composición en el fondo y la presión en el tope de la columna de destilación binaria, se obtiene la Figura E.16 donde se puede apreciar que la presión llega al valor deseado de 1 atm, tanto para el caso anterior como para este. La composición en el tope es cercana a 1, con una pequeña variación en comparación al caso anterior y finalmente la composición en el fondo toma un valor cercano a 0, que también para esta variable de entrada tiene un comportamiento diferente de estabilización al primer grupo de variables.

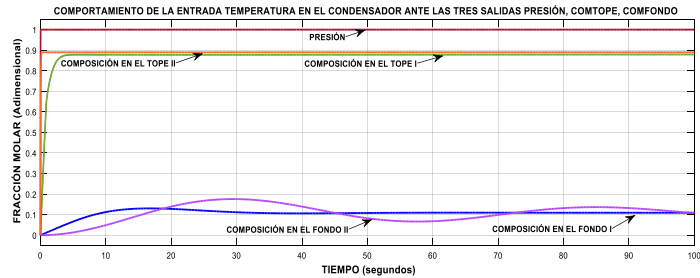


Figura E.16 Respuesta de la segunda variable de entrada, que es la temperatura en el condensador, en relación a las tres variables de salida y que son: composición en el tope, fondo y presión en el tope, control mediante el controlador difuso desarrollado, Fuente: Autor.

La tercera variable de entrada es el reflujo que es medido en fracción molar y las de salida siguen siendo: la composición en el tope, la composición en el fondo y la presión en el tope, lo cual se muestra en la Figura E.17.

Aquí la presión llega al valor deseado de 1 atm para el primer y segundo caso, pero para este grupo de variables tiene un comportamiento subamortiguado, como el que se muestra con un color celeste en esta figura. La composición en el tope con un valor cercano a 1, tiene una variación para el primer caso, pero permanece igual para el segundo y tercer caso y la composición en el fondo que toma un valor cercano a 0 tiene un comportamiento individual para uno de los casos incluido.

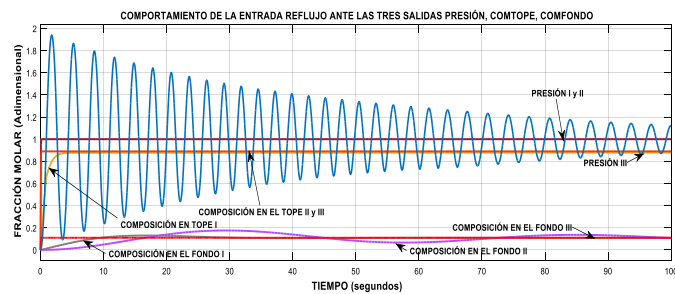


Figura E.17 Curva de control de una de las variables de salida ante una señal escalón de reflujo, control mediante el controlador difuso desarrollado, Fuente: Autor.

E.2.5 Diseño del controlador basado en Reguladores Lineales Cuadráticos (LQR), con la finalidad de controlar los parámetros de E/S planteados al inicio de esta práctica.

Para el desarrollo de esta estrategia al proceso de destilación binaria se parte de plantear los datos obtenidos en espacio de estado en MATLAB®.

```
A= [-0.0140      0.0043      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0.0095   -0.0138      0.0046      0 0 0 0 0 0 0
0 0.0005;
0 0.0095   -0.0141      0.0063      0 0 0 0 0 0
0.0002;
0 0 0.0095   -0.0158      0.0110      0 0 0 0 0
0;
0 0 0 0.0095   -0.0031      0.0150      0 0 0 0
0;
0 0 0 0 0.0220   -0.0350      0.0220      0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0.0202   -0.0422      0.0280      0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0.0202   -0.0482      0.0370      0
0.0002;
0 0 0 0 0 0 0 0.0202 -0.0572 0.0420 0.0005;
0 0 0 0 0 0 0 0 0.0202   -0.0483      0.0005;
0.0255 0 0 0 0 0 0 0 0 0.0255 -0.0185];

B= [0 0 0; 5.0000e-06 -4.0000e-05 2.5000e-03; 2.0000e-06 -
2.0000e-05 5.0000e-03; 1.0000e-06 -1.0000e-05 5.0000e-03;
```

```

0 0 5.0000e-03; 0 0 5.0000e-03; -5.0000e-06 1.0000e-05
5.0000e-03; -1.0000e-05 3.0000e-05 5.0000e-03;

```

```

-4.0000e-05 5.0000e-06 2.50000e-03; -2.0000e-05 2.0000e-
06 2.50000e-03; 4.60000e-04 4.60000 e-04 0]

```

```

C= [0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0; 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1];

```

%El valor de matriz D, no da el ejercicio y se lo asume como 0.

D = zeros (3,3); %Seguidamente se procede a definir el tiempo de muestreo y las matrices que se definieron previamente con el nombre "Plant" usando para esto las siguientes instrucciones:

```

Ts = 6; Plant = ss (A, B, C, D, Ts); Plant.InputName =
{'u1','u2','u3'};

```

```

Plant.OutputName = {'T','T_1','T_2'};

```

```

Q = [44.44 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0;

```

```

0 0 44.44 0 0 0 0 0 0
0 0 0;

```

```

0 0 0 44.44 0 0 0 0 0
0 0 0;

```

```

0 0 0 0 44.44 0 0 0 0
0 0 0;

```

```

0 0 0 0 0 44.44 0 0 0
0 0 0;

```

```

0      0      0      0      0      0      44.44  0      0
0      0      0;

0      0      0      0      0      0      0      44.44  0
0      0      0;

0      0      0      0      0      0      0      0      44.44
0      0      0;

0      0      0      0      0      0      0      0      0
44.44  0      0;

0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
44.44  0;

0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0  12.5];

```

```
R = [44.44  0      0; 0  44.44  0; 0      0  12.5];
```

```
% [K, Qp] = lqry (Plant, Q, R);
```

```
K=lqr (A, B, Q, R)
```

```
% [K, P, E] = lqr(Plant, Q, R)
```

```
%K1=K(1);K2=K(2);K3=K(3);K4=K(4);K5=K(5);K6=K(6);K7
=K(7);K8=K(8);K9=K(9);K10=K(10);K11=K(11);
```

```
K1=K (1); K2=K (2); K3=K (3);
```

```
AA=A-B*K; BB=B*K1; CC=C; DD=D
```

```
t=0:0.01:500
```

```
[y,x,t]=step(AA,BB,CC,DD,1,t)
```

```

figure(1); plot(t,y)

grid; title (' Respuesta escalón del sistema de control óptimo
cuadrático')

xlabel('tSeg'); ylabel ('y1CompoFondoT [Adim],
y2CompoTopeT [Adim], y3PresiónTope [Pa]')

disp('Esta en pausa 1, vea Fig. 1, continúe con Enter'); pause;
figure(2); plot(t,x)

%plot (t, x1,'----'); grid

title ('Response curves X1 to X11 against t'); xlabel('tSeg');
ylabel('11 Intermediate States')

title('Los 10 Estados Intermedios y la Presión en el domo
contra t')

ylabel('CompoFondo,CompoTopeT,PresiónTope,CompoPla2,
CompoPla3, CompoPla4,CompoPla5, CompoPla6,
CompoPla7, CompoPla8,CompoPla9 contra t')

```

E.2.5.1 Cálculo de las matrices Q y R del Controlador LQR (Regulador Lineal Cuadrático)

La modelación y control de columnas de destilación es una tarea compleja, ya que el proceso reúne varias características que dificultan el control por métodos clásicos, debido en gran parte al comportamiento no lineal y a que está sujeto a restricciones operativas. Todas estas características limitan la eficacia de los controladores lineales (Machado, 2003).

Por tanto, al aplicar al proceso de destilación esta estrategia de control avanzado se desarrolló un programa en MATLAB®, que permitió introducir el sistema representado en el espacio de

variables de estado y así poder identificar los espacios de estados intermedios, que en este caso son 11 a controlar.

Es decir, en cada cuadrícula debe corresponder el valor (i, j) que le corresponde a esta matriz, de igual forma se debe considerar para las matrices B, C, D, teniendo en cuenta que el tamaño va ser diferente.

Los valores de las matrices Q y R. El tamaño de la matriz R depende del número de entradas del proceso, para este caso están definidas tres, por lo tanto, el orden es de 3x3.

Con los valores hallados anteriormente se reemplazan en la ecuación (13), lo cual permite hallar los valores de las ganancias de retroalimentación, que para este caso son los siguientes: (K1= 0,0041; K2= $7,16 \times 10^{-4}$; K3= -0,2491; K4= 0,0024; K5= -0,0037; K6= -0,0965; K7= 0,0017; K8= -0,0036; K9= 0,3980; K10= $8,619 \times 10^{-4}$; K11= -0,0024).

Toda la metodología para hallar los valores necesarios se muestran en el capítulo III.

El LQR. presentan una gran libertad de diseño y entrega una ley de control de bajo costo computacional, lo que hace posible su implementación en sistemas de control digital, Sin embargo, aunque el control LQR es esencialmente proporcional, es necesaria la incorporación de una acción integral, para cancelar posibles errores estacionarios en aquellas variables que se consideren necesarias (Morian, P., & Naranjo. 2012).

La modelación y control de columnas de destilación es una tarea compleja ya que el proceso reúne varias características que dificultan el control por métodos clásicos, debido en gran parte al comportamiento no lineal y a que está sujeta a restricciones. (Machado, 2003).

Por tanto, al aplicar al proceso de destilación esta estrategia de control avanzado se desarrolló un programa en MATLAB®, que permitió introducir el sistema representado por las matrices A, B, C, D, en espacio de estados tomando en cuenta que el tamaño va hacer diferente y así poder identificar los espacios de estado intermedios, que en este caso son 11 a controlar.

Los valores mínimos y máximos que se obtienen en cada espacio de estado con la ayuda de MATLAB®, y que se usan para calcular las matrices Q y R se muestran en la Tabla E.3.

Tabla E.3 Valores máximos y mínimos que permiten calcular las matrices Q y R de desempeño cuadrático.

Nombre de la Variable de Estado	Unidad de Medida Factor Molar	Valor Mínimo de Trabajo		Valor Máximo de Trabajo		Diferencia de valores obtenidos experimentalmente
		Entrada (R)	Salida (Q)	Entrada (R)	Salida (Q)	
X1(Compo. Vol en el condensador)	Comp. del condensador(Adimensional)	0	0,85	0	1	0,15
	Comp. Vol en el plato #1 (Adimensional)	0,85	0	1	0	0,15
X2(Compo.	Comp. Vol en el plato #1 (Adimensional)	0	0,85	0	1	0,15

Vol en el plato #1)	Comp. Vol en el plato #2 (Adimensional)	0,85	0	1	0	0,15
X3(Compo. Vol en el plato #2)	Comp. Vol en el plato #2 (Adimensional)	0	0,85	0	1	0,15
	Comp. Vol en el plato #3 (Adimensional)	0,85	0	1	0	0,15
X4(Compo. Vol en el plato #3)	Comp. Vol en el plato #3 (Adimensional)	0	0,85	0	1	0,15
	Comp. Vol en el plato #4 (Adimensional)	0,85	0	1	0	0,15
X5(Compo. Vol en el plato #4)	Comp. Vol en el plato #4 (Adimensional)	0	0,85	0	1	0,15
	Comp. Vol en el plato #5(Adimensional)	0,85	0	1	0	0,15
X6(Compo. Vol en el plato #5)	Comp. Vol en el plato #5(Adimensional)	0	0,85	0	1	0,15
	Comp. Vol en el plato #6Adimensional)	0,85	0	1	0	0,15

X7(Compo. Vol en el plato #6)	Comp. Vol en el plato #6(Adimensional)	0	0,85	0	1	0,15
	Comp. Vol en el plato #7(Adimensional)	0,85	0	1	0	0,15
X8(Compo. Vol en el plato #7)	Comp. Vol en el plato #7(Adimensional)	0	0,85	0	1	0,15
	Comp. Vol en el plato #8(Adimensional)	0,85	0	1	0	0,15
X9(Compo. Vol en el plato #8)	Comp. Vol en el plato #8(Adimensional)	0	0,85	0	1	0,15
	Comp. Vol en el plato #9(Adimensional)	0,85	0	1	0	0,15
X10(Compo. Vol en el rehervidor)	Comp. Vol en el plato #9(Adimensional)	0	0,85	0	1	0,15
	Comp. Vol en el rehervidor(Adimensional)	0,15	0	0	0	0,15

X11(Presión)	Comp. Vol en el rehervidor(Adimensional)	0	0,15	0	0	0,15
	Presión (atm)	0,92	0	1	0	0,08

Fuente: Autor

Aplicando los valores señalados en la tabla anterior en las ecuaciones (11) y (12), respectivamente, se obtienen las matrices Q y R:

Lo señalado anteriormente se muestra en la Figura E.18, en donde se presentan los estados intermedios con la ayuda de Simulink/MATLAB®, aquí se puede apreciar que cada integrador en el esquema disminuye en un grado la derivada hasta dejar la salida $Y=X_1$.

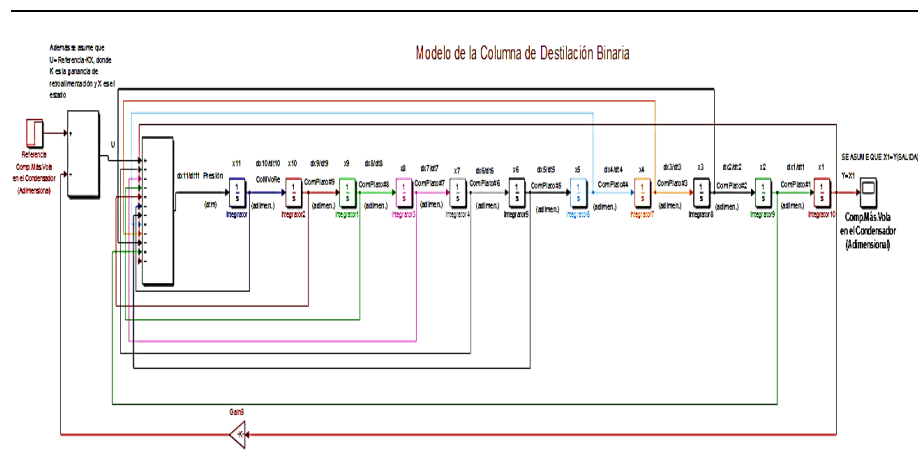


Figura E.18 Implementación en MATLAB®/ Simulink del controlador LQR, con una entrada escalón que afecta a cada uno de los espacios intermedios, Fuente: Autor.

Para la aplicación del LQR, primeramente, se realiza un programa adecuado que permite obtener una respuesta escalón, que tiende a buscar un valor óptimo tal como se muestra en la Figura E.19.

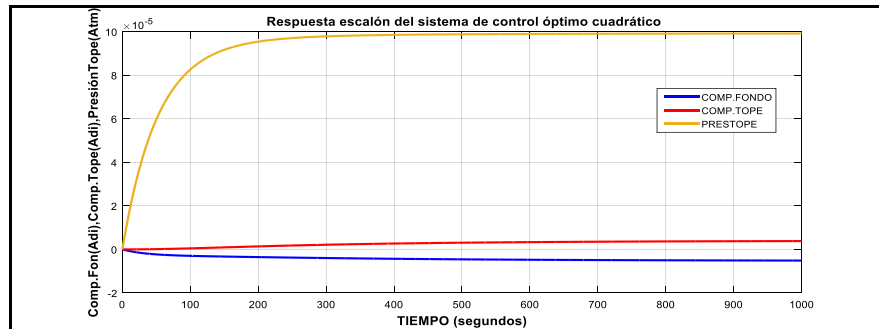


Figura E.19 Simulación de la respuesta escalón del sistema, control mediante el controlador de control óptimo cuadrático LQR, Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta que este método permite identificar y conocer el comportamiento de cada uno de los 11 estados intermedios, incluida la presión en el domo o parte superior de la columna de destilación, se procedió a simular el proceso durante 1 000 segundos. Obteniéndose como resultado la Figura E.20, que muestra que todos los estados convergen a cero, como era de esperar.

Pero el tiempo de estabilización es grande, aunque el valor negativo desde el comienzo indica que casi siempre estuvo en cero. Lo correcto es considerar el valor lo más cercano al cero todos los estados intermedios, debido principalmente a se minimiza a cero el cuadrado del error, es decir, referencia menos salida todo al cuadrado.

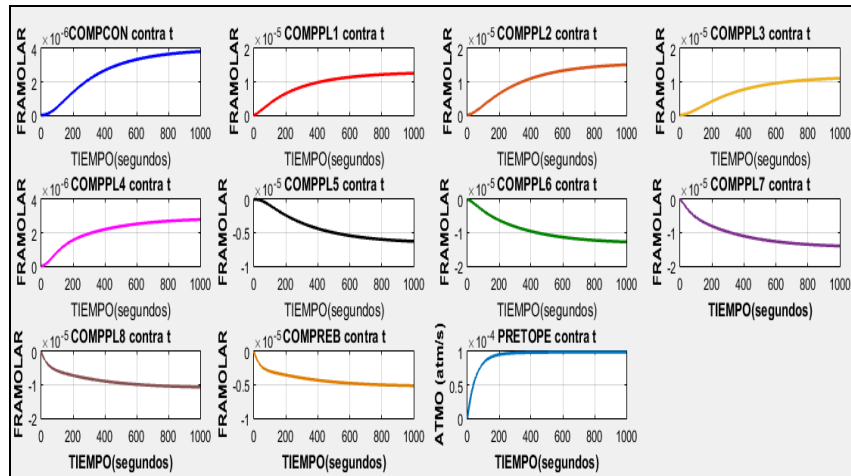


Figura E.20 Respuestas temporales del sistema de control de los 11 estados intermedios, incluida la presión en el domo de la planta objeto de estudio con estructura LQR, Fuente: Autor.

E.3 Momento final de la práctica.

En esta etapa de la práctica el estudiante debe presentar los resultados obtenidos al aplicar al proceso 2 técnicas diferentes de control avanzado, con una entrada escalón de 100 segundos de simulación, en el caso del control difuso y de 1 000 segundos en el caso del regulador basado en LQR. Debido principalmente a esta diferencia de tiempo, es la causa por la cual se demora mucho más tiempo en estabilizarse el proceso con esta última estrategia.

Además, como fueron desarrolladas anteriormente con datos de un evento IFAC, debería obtener valores los más cercanos a los de Tabla E.4, pudiendo el estudiante aplicar otras estrategias de control para mejorar estos resultados alcanzados y simularlos en Simulink®.

Tabla E.4 Resultados comparativos de simulación de las respuestas temporales del sistema de control de los motores de las electroválvulas con estructuras Difusa y LQR.

CONTROLADOR I (DIFUSO)										CONTROLADOR II (LQR)
	I GRUPOS DE VARIABLES			II GRUPO DE VARIABLES			III GRUPO DE VARIABLES			
	Co Fo	Co To	P RE	Co Fo	Co To	P RE	Co Fo	Co To	PR E	
MÁXIMO SOBRE PICO	10 %	10 %	0 %	0%	13,3%	0 %	0%	0 %	99 %	Es demasiado bajo para ser tenido en cuenta.
TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN	30 s	3 s	0 s	100 s	0 s	0 s	0 s	0 s	113 s	Sobrepasa los 1 000 segundos excepto para la presión que en 290 se estabiliza
TIEMPO DE SUBIDA	1,5 s	9 s	0 s	23 s	0 s	0 s	0 s	0 s	2 s	Es muy pequeño para los

LEVANTAMIENTO										11 estados
ERROR EN ESTADO ESTABLE	0,02 adm.	0,05 adm.	0 atm.	0,02 adm.	0 adm.	0 atm.	0 adm.	0 adm.	0,02	Es muy bajo pequeño en fracción molar

Fuente: Autor.

Lo que se demostró con el uso de reguladores LQR, que se usa en esta tesis en la prácticas de trituración y de destilación binaria, pero como el uso de estos reguladores permite conocer los estados intermedios solo en simulaciones y no aplicaciones reales, y este es uno de los grandes problemas que tiene esta metodología LQR, se plantea cuando la columna de destilación binaria, que está en proyecto de construcción esté funcionando, aplicarle Observadores de Luenberger o Filtros de Kalman.

ANEXO F:

Los planos que se muestran en las Figuras. F.1, F.2, F.3 y F4, respectivamente, pertenecen a una parte del prototipo de trituración, banda transportadora y zaranda desarrollados en la UNL y cuyas dimensiones de sus cotas están en milímetros, además, con estos planos se *justifica también la contribución teórica de la tesis.*

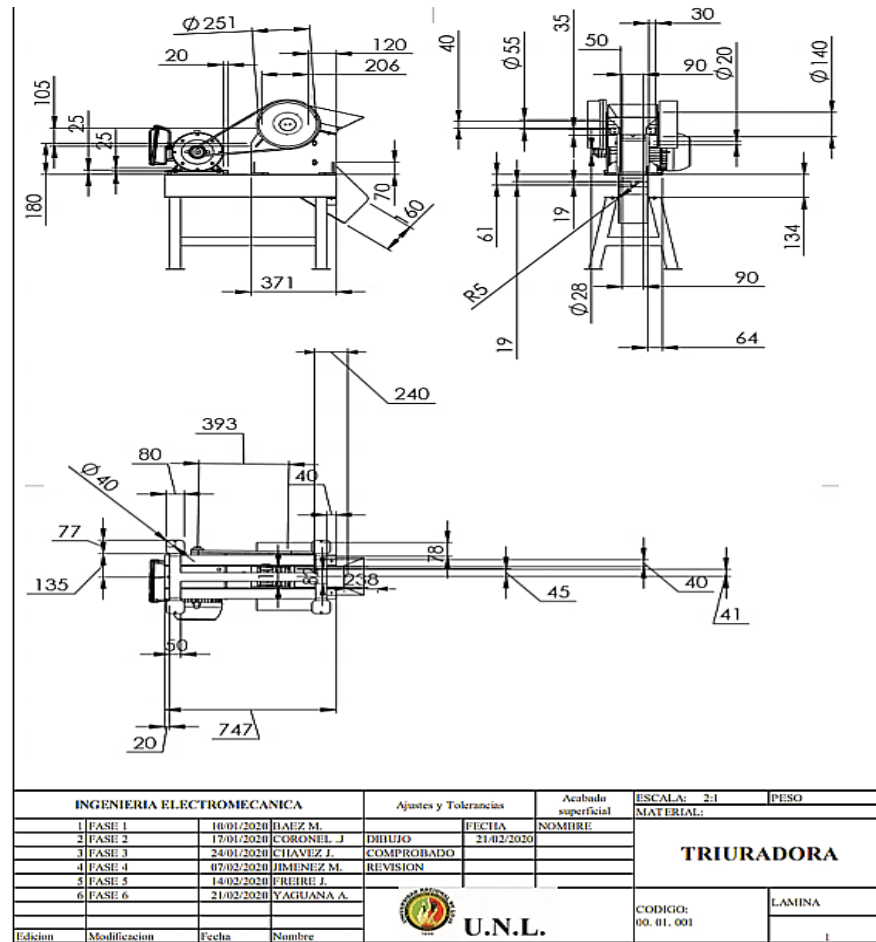


Figura F.1 Vista Lateral, izquierda superior, Vista frontal, derecha superior, Vista superior, parte inferior, las unidades de los planos son en mm y una escala de 2:1, de la trituradora, Fuente: Estudiantes de la UNL.

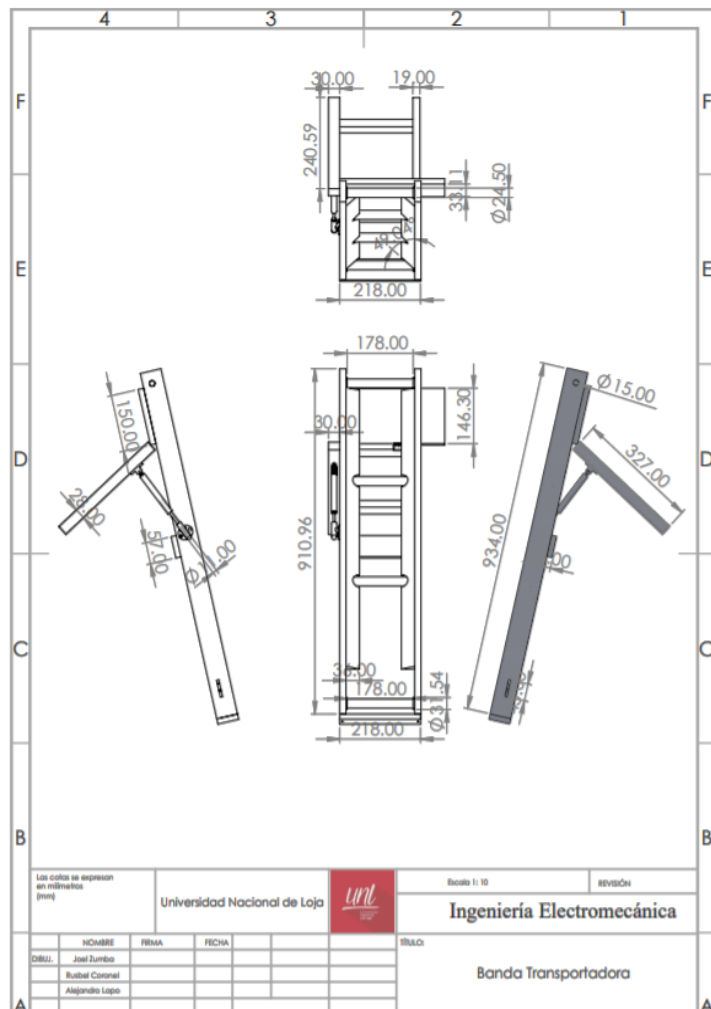


Figura F.2 Banda transportadora (Vistas), Fuente: Estudiantes de la UNL.

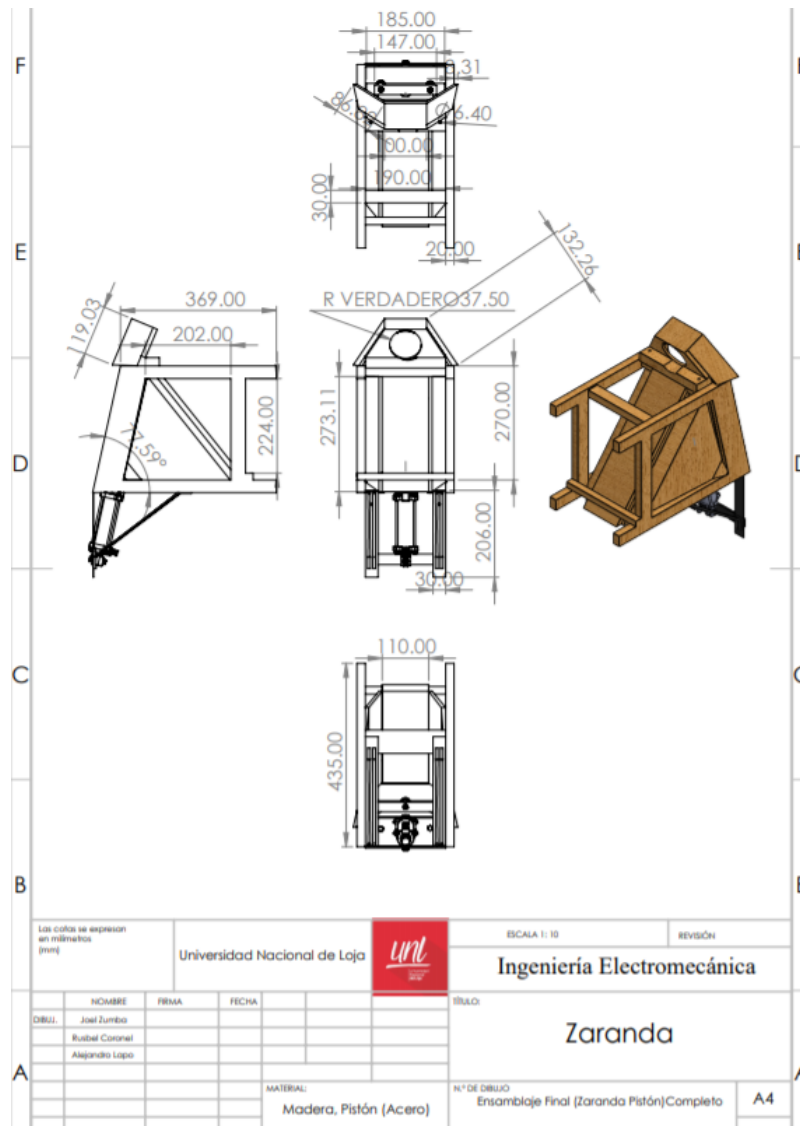


Figura F.3 Zaranda (Vistas), Fuente: Estudiantes de la UNL.

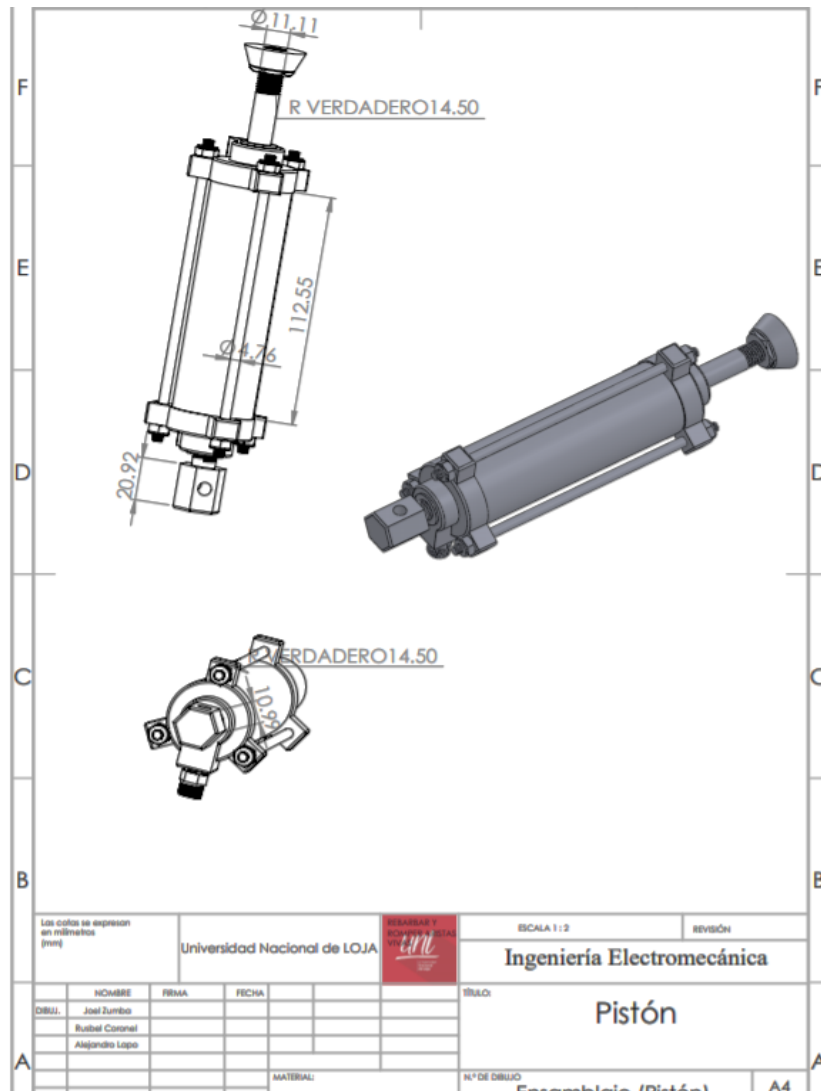


Figura F.4. Cilindro de simple efecto que mueve la zaranda para cernir el material triturado, está ubicado a la salida de la banda transportadora, Fuente: Estudiantes de la UNL.

ANEXO G:

Requerimientos de hardware y software.

A continuación, se detalla las características que debe poseer el servidor que soportaría la plataforma Moodle y en el que estarían instalados y conectados los experimentos o prácticas de laboratorio, esto se puede apreciar en la Tabla. G.1, G2, G3, G4, respectivamente.

Tabla. G.1 Requerimientos que debe poseer el servidor que soportaría la plataforma Moodle:

CARACTERÍSTICAS MÍNIMAS DEL SERVIDOR	
Procesador	Intel® Core 2Duo 2,2 GHz
Memoria	2 Gb expandibles
Almacenamiento	Disco SAS de 300 GB
Comunicaciones	1 puerto Ethernet 100 Mbps
Periféricos	Lectora de DVD/CD, Puerto USB

Fuente: Autor.

Las características del computador del que se puede acceder al sistema para ejecutar los experimentos son las siguientes:

Tabla. G.2 Características mínimas del computador personal.

CARACTERÍSTICAS MÍNIMAS DEL SERVIDOR	
Procesador	Intel® Core 2Duo 2,2 GHz
Memoria	512 MB
Almacenamiento	Disco Duro de 160 GB
Comunicaciones	1 puerto Ethernet 100 Mbps
Periféricos	Lectora de DVD/CD, Puerto USB, teclado y mouse

Fuente: Autor.

Tabla. G.3 Equipos requeridos y características mínimas.

Una cámara digital	Marca: Unibrain
	Modelo: Model Fire-i
	Tipo: Ultra-Compact/Mini
	Tipo de usuario: Viajero, principiante, intermedio
	Sistema Operativo: Windows, Mac, Linux

Fuente: Autor.

Para el correcto funcionamiento del sistema se indica en la Tabla G.4, los siguientes programas instalados:

Tabla. G.4 Programas requeridos.

PROGRAMAS	
Sistema Operativo (32 o 64 bits)	Windows, Mac, Linux
Plugins	Java y Flash player
Navegador Web	Mozilla Firefox (recomendado), Internet Explorer, Google Chrome, Safari u Opera.

Fuente: Autor.

ANEXO G.1:

En la Tabla.G.1.1 se presentan todos los materiales y equipos empleados para volver operativo al prototipo de trituración de cobre, y de esta manera desarrollar la práctica de trituración de cobre en tiempo remoto.

Tabla. G.1.1 Se indica los materiales que se necesitan para la implementación de la práctica de trituración de cobre

N°	Nombre	Alimentación	Tipo de señal	Rango de señal	Modelo	Descripción
1	Cámara IP	110 V AC	Inalámbrica o por puerto Ethernet,		Jortan, JT-110BW-2A	Para comunicar al MFC, a través de Internet.
1	Computador a portátil.	100/240 V AC 2,5 A	AC/CD	19,5 V CD 6,7 A	DELL, Core I7	Debe estar en el laboratorio todo el tiempo para la práctica.
2	DAQ	A través del puerto serial de una Computadora	Digitales, Analógicas y PWM	0-5 V, entradas	Arduino MEGA	Se la emplea para el control del cierre de las mandíbulas de la trituradora, banda y zaranda.
1	Motor Bifásico, de 3 Hp	110/220 V AC	Eléctrica de Voltaje	220 V AC	Weq	Para mover el tambor de la trituradora.
1	Motor bipolar, PAP	7 a 30 V CD	PWM, porque el valor eficaz varía en función de ciclo de trabajo.	Que generan una onda cuadrada estable con un determinado ciclo de trabajo, especificado por el programador y una	Vexta NEMA 23	Para mover las mandíbulas de la Trituradora.

				frecuencia de 490 Hz		
1	Motor bipolar, PAP	7 a 30 V CD	PWM, porque el valor eficaz varía en función de ciclo de trabajo.	En el caso de regulación de la tensión, las señales de modulación en ancho de pulso dependiendo del ciclo de trabajo, se traducen en niveles eficaces de tensión, por lo que al final lo que se está haciendo es variar la tensión de alimentación de una señal PWM.	Vexta NEMA 17	Para mover la banda transportadora
2	Fuente de alimentación	Fuente externa de 7 a 30 V CD	CD	7 a 30 V CD	Realizada por los estudiantes de la CIE	Para alimentar a los motores desde los controladores para el control y potencia.
2	Fuente de alimentación	Fuente externa de 3.3 a 5 V CD	CD	7 a 30 V CD	Realizada por los estudiantes de la CIE	Para alimentar al microcontrolador de control y potencia (alimentando el

						polo positivo y negativo de la fuente con la alimentación positiva y negativa del microcontrolador)
2	Controlador Pololu	Voltaje Lógico: 3,3 V-5,5 V CD	Corriente: 1 A por bobina, máximo 2 A	Voltaje de potencia: 8 V- 35 V CD	A4988 Pololu	Para alimentar al motor desde el controlador de control y potencia.
1	Base	Ninguna	Ninguna	Ninguna	De madera o aluminio	Para colocar un plato donde se recogerá el material triturado.
1	Celda de Carga, transductor de fuerza a señal eléctrica	mV	Salida nominal: 1,0 +/- 0,15mV/V	Rango de carga 2kg	C-Carga 2kg	Para medir el peso a la salida de la zaranda, es decir, tiene un voltaje máximo de 15 DC
1	Amplificador para celda de carga	mV	2 canales de entradas analógicas	ADC de 24 bits	HX711, es una interfaz	Se encarga de amplificar la señal de voltaje en mV que entrega la celda de carga.
3	Resistencias	Una de 333 Ω y dos de 10 k Ω	Normalizado	Este acondicionamiento se da con la resistencia de 333 Ω es	Normalizado	Trabaja con la celda de carga. Entre el terminal de la salida y el terminal de la

				ajustada por ganancia.		referencia REF, se conecta un divisor de tensión que acondiciona la señal del sensor, permitiendo establecer la señal de salida del amplificador operacional en un rango entre -5 y 5 voltios para el A/D de la tarjeta Arduino
1	Resistencia ajustada por ganancia	voltaje	Normalizado	Normalizado	Normalizado	Potenciómetro para pruebas.
1	Capacitor	10 μ F	μ F	0 a 10 μ F	Normalizado	Para realizar algunos filtros pasa bajos.
1	Compresor	110 V/60 Hz	Analógica	0-12 bar; 0-170 psi	Porten; PCo-0224	Para suministrar flujo de aire a la electroválvula.
1	Cilindro de simple efecto	Flujo de aire que proviene de la electroválvula	16 N al inicio y de 20 N en movimiento	Carrera de 100 mm, con una velocidad de 110mm/s	Festo	Permite con la carrera de su embolo agitar la canasta de la zaranda.
1	Electroválvula	24 V CD, 4,8 W y 200 mA	Salida digitas	0,15 – 0,8MPa	AS1, 3V210-08	Para comandar el movimiento del cilindro de simple efecto de la zaranda.

1	Contactador bifásico	2 fases de 110 V	AC	40 A	Schneider /Electric	Para la protección de todo el sistema, en la caja de entrada de CA.
1	Banda	Motor PAP, con engranajes para mover la banda.	Transporte de material triturado	Limitado por el material de la banda.	Madera, realizada por los estudiantes de la CIE	Para transportar el material triturado que sale del prototipo de trituración.
1	Zaranda	Golpe del cilindro de simple efecto.	Balaneo o agitación	Limitado por el material de la zaranda.	Madera, realizada por los estudiantes de la CIE	Para clasificar el material que sale de la banda transportadora.

Fuente: Autor.

Para este trabajo se usó la DAQ Arduino MEGA. Se empleó un motor bipolar que está compuesto por dos bobinas y cada bobina tiene un polo positivo y un polo negativo.

El HX711 tiene 4 entradas, cada entrada para un cable de la bobina y que son: la 1b, 1a, 2b, 2a; el número 1 significa que es la bobina 1 y la letra b que es el negativo de la bobina.

Para conectar la DAQ Arduino se elige el pin dirección, paso y reset del HX711.

Luego conectar el pin dirección a uno que no sea PWM por ejemplo el pin 2, o puerto de la tarjeta 2, seguidamente se

conecta el pin reset a otro PWM por ejemplo el 9, aunque no tiene importancia ya que los pines de Arduino pueden funcionar como un pin normal. Haciendo uso de los pines PWM del Arduino se puede hacer uso de estos pines que van desde 0 a 255,

G.1.1 Programa para cierre de las mandíbulas de la Trituradora

Seguidamente, se detallan en la Tabla G.1.2 todos los programas que se emplearon en Arduino para sensar el peso a la salida de la trituradora, controlar el cierre de la trituradora y finalmente transportar el material hasta una zaranda, donde se cierra el material triturado que cumple con el tamaño deseado pasa por los orificios de una malla metálica.

Esta cernidera es movida por un cilindro de simple efecto, cuyo flujo de aire es comandado por una electroválvula, que a su vez es alimentada por un compresor.

Tabla. G.1.2 Se muestra los programas desarrollados para interactuar entre MATLAB® y Arduino y la práctica de trituración de cobre

Para mover las mandíbulas de la trituradora, con un motor bipolar PAP.	
EQUIPO	INSTRUCCIONES QUE SE TRANSFIEREN A LA TARJETA DE ARDUINO MEGA.
MOTOR BIPOLAR PAP, NEMA 23.	<pre>#include < stepper.h, #define motorsteps200//define el número de pasos, en este caso es de 200 pasos por vuelta, #define motor Pin13// definen los pines de control que van a ese motor, la placa shield impone estos pines, #define motor Pin12, //Se inicializa la librería del motor pap de Arduino, stepper mystepper(motorsteps,motorPin1, motorPin2)</pre>

	<pre> void set up () { // Se desea que se envíe los datos y que se detenga en el monitor const int pwm_cha=3; const int pwm_chb=11; pin.Mode(pwm_cha, OUTPUT); pin.Mode(pwm_chb, OUTPUT); digitalWrite(pwm_cha, HIGH); digitalWrite(pwm_chb, HIGH); mystepper.setspeed(30) // Se define con esta función la velocidad del giro del motor. serial.begin (9600) // Inicializando en el puerto serie, además de definir la velocidad con la que se envían los datos. }void loop () { <i>POSICIÓN I.</i> //200 pasos hacia adelante para la posición I; serial.println('Giro en contra de las manecillas del reloj'); mystepper.step(200); delay(25000) // Se detiene por 18 segundos hasta realizar otro experimento <i>POSICIÓN II.</i> //200 pasos hacia adelante para la posición II; serial.println('Giro en contra de las manecillas del reloj') // Se define una instrucción para imprimir los datos, mystepper.step(200); delay(25000) // Se detiene por 18 segundos hasta realizar otro experimento <i>POSICIÓN III.</i> </pre>
--	--

	<pre>//200 pasos hacia adelante para la posición III serial.println('Giro en contra de las manecillas del reloj'); mystepper.step(200); delay(25000)//Se detiene por 18 segundos hasta realizar otro experimento POSICIÓN IV. //200 pasos hacia adelante para la posición IV; serial.println('Giro en contra de las manecillas del reloj'); mystepper.step(200); delay(25000)//Se detiene por 18 segundos hasta realizar otro experimento.</pre>
Para la adquisición de datos, con Arduino y la celda de carga.	
EQUIPO	INSTRUCCIONES QUE SE TRANSFIEREN A LA TARJETA DE ARDUINO MEGA.
CELDA DE CARGA	<pre>%-- 30/06/2015 19:31 --% install_arduino cIO=arduino('COM3') %-- 08/07/2015 15:08 --% cIO=arduino('COM3') cIO.analogRead(0) cIO.analogRead(9) GRÁFICASVOLTAJE cIO=arduino('COM3')</pre>

```

cIO.analogRead(o)
GRÁFICASVOLTAJE
cIO.analogRead(o)
in=0
tic
i=0
while toc<30 %ejecutamos durante 30 segundos
i=i+1%incrementamos la variable de control
time(i)= toc %crea un vector que crea los diferentes
momentos dados por 'toc'
v(i)=a.analogRead(in);%vector que almacena los
valores muestreados de tensión
%en cada ciclo de ejecución
figure (1); %abre una ventana para graficar
plot(time,v/256,'b');%grafica los valores de tensión
muestreados
pause (0.25); %crea una pausa de 1/4 de segundo
entre una muestra y otra
%sino se coloca ninguna pausa la señal muestreada
será prácticamente
%igual a la señal de entrada
End

```

Para mover la banda transportadora a la salida de la trituradora, con un motor bipolar PAP.	
EQUIPO	INSTRUCCIONES QUE SE TRANSFIEREN A LA TARJETA DE ARDUINO MEGA.
MOTOR BIPOLAR PAP, NEMA 17.	<pre> %% Crear en Arduino objeto en MATLAB® %Posibles errores usando el o en vez de O en asdobject %Sería bueno al colocar secciones con %, dejar claro que nos permite %poder hacer correr nuestro programa en secciones con Run Advance ardobject = arduino (' com8', 'Due', 'Libraqries', 'Adafruit\MotorShieldV2'); %% Crear en addonShield object for the V2 Motor shield addonShied = addon (ardobject, 'Adafruit\MotorShieldV2'); %%El control del servomotor se hace desde el Puerto 1, nótese que es diferente el puerto 1 del servo desde el motor al puerto 1 al campo del motor. servoMotor= servo (addonShied, 1); for count= 1:5 for angle = 0:0.1:1 % Desde 0 grados a 180 grados writePosition(servomotor, angle); </pre>

```

        pause (0.01);
    end
    pause (1);
    for angle = 1:0.1:0
        writePosition(servoMotor, angle);
        pause (0.01);
    end
    pause (1)
end

%%MOTORES PASO A PASO
%Control del motor paso a paso desde el puerto 2
stepperMotor=stepper(addonshield,2,200);
%Ejemplo que usa el motor pap -----stepper
(shieldObject, portNum, StepsPerRevolution)
for count= 1:5
    stepperMotor.RPM =20;
    move (stepperMotor, 50);
    pause (1);
    move (stepperMotor, 50);
    pause (1);
end

```

	<pre>%Liberacion del motor paso a paso %%dcMotorObject= dcmotor (addOnShield, 1); dcMotorObject.Speed = 0.05; %la velocidad es de 0.05 start (dcMotorObject); pause (5); dcMotorObject.Speed =- 0.05; pause (5); stop (dcMotorObject); %% Clean up; Clear arduinoObject addOnShield servomotor stepperMotor dcMotorObject.</pre>
--	---

Fuente: Autor.

ANEXO H:

H.1 Práctica sobre el análisis estadístico de los datos hallados experimentalmente de la trituradora e identificación de modelos matemáticos empleando la herramienta CADCS

Los datos para la simulación del proceso, se obtuvieron al excitar el proceso de trituración con un paso escalón y de esta manera determinar el período de muestreo correcto, para realizar los experimentos de identificación. Cabe señalar que los datos que se obtuvieron fueron en lazo abierto.

Esto se logra con el uso de un contacto normalmente abierto en la tarjeta de Arduino, que al accionarlo se obtiene un 0 y un 1 lógico. A los que les corresponde un mínimo y máximo de tensión respectivamente.

Seguidamente en la Figura H.1 se puede apreciar la respuesta ante una señal de entrada paso escalón, o lo que se conoce en inglés como (step-test), cuyo valor para los experimentos realizados es uno y que está representado con un color azul, así mismo la respuesta a esta entrada se puede apreciar con un color marrón. En cada una de las mediciones realizadas o para cada posición se han realizado 256 experimentos, con su respectivo retraso en el tiempo, debido al transporte de material en una banda a la salida de la trituradora y cuyo valor es de 17,58 segundos.

En cada experimento se puede apreciar el incremento en la salida, porque la celda de carga empieza a recibir un mayor peso que cae de la banda transportadora. La amplitud de esta señal de consigna o entrada es de 2 kg (paso de 0 kg a 2 kg).

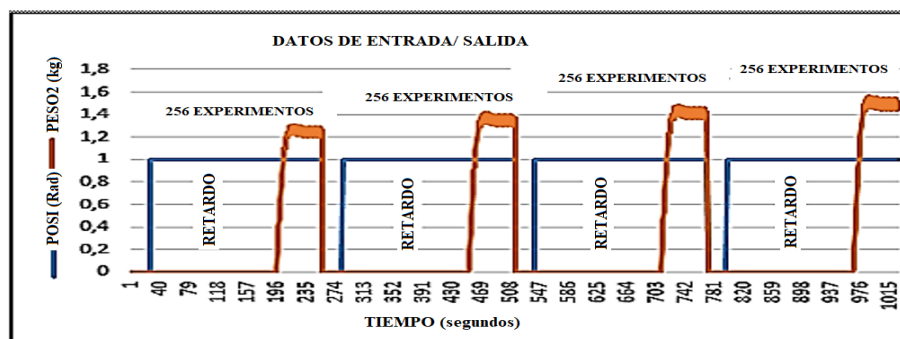


Figura H.1 Representación de los datos obtenidos en cada una de las posiciones que se emplearon para mejorar la trituración del material, Fuente: Autor.

A continuación, en la Tabla H.1, se muestran algunos valores que se deben considerar para la selección del mejor retardo.

Tabla H. 1 Pares de valores de los Pasos de retardo y las muestras de la Auto-correlación

Pasos de retardo	Muestras de Auto-correlación	Pasos de retardo	Muestras de Auto-correlación
0	1,0000	11	0,8023
1	0,9871	12	0,7802
2	0,9738	13	0,7565
3	0,9596	14	0,7340
4	0,9436	15	0,7117
5	0,9249	16	0,6888

6	0,9064	17	0,6647
7	0,8874	18	0,6420
8	0,8673	19	0,6194
9	0,8451	20	0,5964
10	0,8237	21	Solo se puede encontrar 20 retardos

Fuente: Autor.

En la Figura H.2 se presentan la correlación más fuerte en el instante 169 (Lag), es decir, 16,9 es el valor correcto con un valor de 0,211 que son las muestras de correlación, representada en el eje de las y. Así también, se conoce que $T_s = 1/10$ segundos por lo que el retardo (τ) se puede calcular como se indica en la ecuación (8).

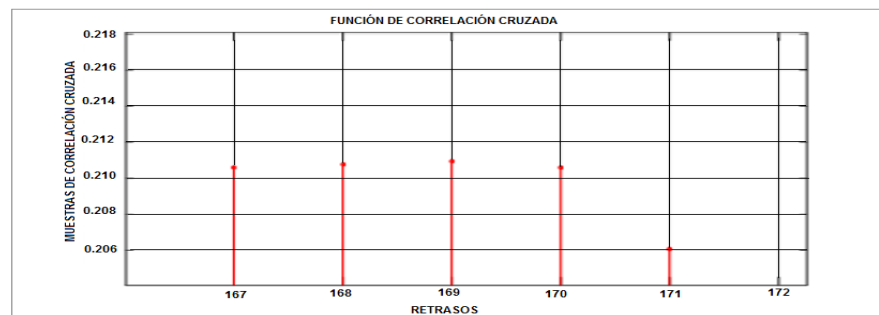


Figura H.2 Correlación cruzada de la entrada (posición) con respecto a la salida (peso), Fuente: Autor.

De la ecuación (8) se extrae que el proceso tiene retardo y que es de 16,9, esto incluye el tiempo que se demora en la trituración de material, más el tiempo que se demora el material en recorrer la banda transportadora hasta que se logra medir, que es muy cercano al valor empleado en los experimentos, quedando finalmente lo que se puede ver en la Figura H.3.

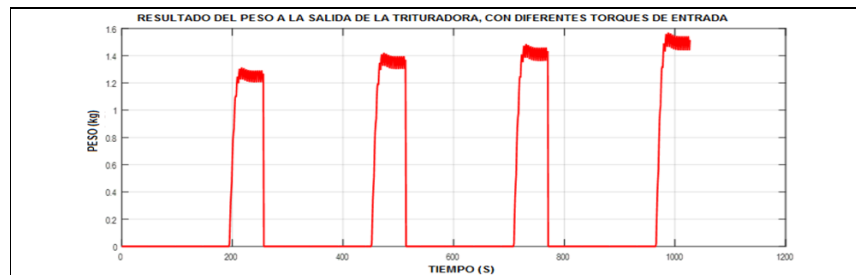


Figura H.3 Representa a la salida PESO₂, por el tiempo de 1 024 (Datos de Fourier), Fuente: Autor.

Basándose siempre en datos estadísticos, hay puntos que deben ser señalados como, por ejemplo, el punto máximo y el punto mínimo, que son necesarios para hallar los puntos de inflexión. Hay algunos valores que deben ser rescatados antes de continuar con el análisis, a continuación, se muestran algunos resultados de este análisis.

Para esto se realiza un programa en el editor de MATLAB[®], ver Anexo I1, (donde se encuentra el programa completo) que permite comprobar la calidad de los datos con los que se están trabajando, los cuales describen realmente la excitación del sistema o si hay presencia de ruido que afecta a las mediciones. En este programa señalado anteriormente se usa la matriz dataprev que contiene los parámetros estadísticos básicos de las señales de entrada y salida medidas, así como la máxima correlación entre éstas y el número de muestreos necesarios para alcanzarla. Los datos numéricos hallados con esta función dataprev se muestran a continuación en la Tabla H.2.

Seguidamente se indica la forma como fue usada esta función:
`dataprev=prev(t,POSI,PESO,nlags,show);`

Tabla H.2 Datos estadísticos obtenidos al usar la función `dataprev`.

Nombre Estadístico	Valor Estadístico	Nombre Estadístico	Valor Estadístico
Promedio Entrada.	0,89883	Promedio Salida.	0,30187
Desv.Est.Entrada.	0,3017	Desv.Est. Salida.	0,55928
Mínimo Entrada.	0	Mínimo Salida.	0
Máximo Entrada.	1	Máximo Salida.	1,5698
Máxima Correlación.	0,50119	Número de pasos para la máxima correlación.	3

Fuente: Autor

Los resultados de los cálculos estadísticos básicos presentado en, *dataprev*, representan los datos de entrada en la parte superior para cada posición (0 Rad, π Rad, $3\pi/2$ Rad, 2π Rad), y en la parte inferior la salida en (1,25 kg, 1,36 kg, 1,42 kg, 1,385 kg, 1,526 kg), al final se obtienen cuatro valores por la dureza de la piedra.

La relación entre las variables se mide a través de un coeficiente de correlación y su valor está comprendido entre 1 y -1, permitiendo afirmar de esta manera si las relaciones entre las dos variables son positiva o negativa.

La auto-correlación se da cuando los valores críticos dependen

tanto del número de observaciones n , como del número de variables independientes k y que, para cada combinación de n y k , existen dos valores críticos, un valor inferior de l y un valor superior de u . En el caso del ejemplo utilizado se tiene 1 024 observaciones y se tiene una variable independiente.

Hay un espacio entre la curva y el eje de las x que se conoce como el peridiograma, esto es, la transformada de Fourier de la densidad espectral de potencia. MATLAB® posee la función FFT, o los coeficientes de Fourier, pero escalados. Esta transformada de Fourier es una idealización, para acercarnos a ella se debería utilizar un periodo de muestreo que tiende a cero y el orden del algoritmo FFT, debería tender a infinito de manera que se abarquen todas las muestras de la señal.

La PSD, (densidad espectral de potencia) está definida en la ecuación (20).

$$\rho = \int_{-\alpha}^{\alpha} S_x(f) df \quad (20)$$

Además, de ser la distribución de la potencia promedio de una señal en el dominio de la frecuencia. Cuando no se habla de procesos estocásticos si no de señales, significa que una señal tiene una potencia promedio y la distribución de esa potencia promedio en el dominio de la frecuencia es lo que se conoce como densidad espectral de potencia. Existe una relación entre la transformada de Fourier y la densidad espectral de potencia, esto se aprecia en la ecuación (21).

$$x(f, T) = \int_{-\alpha}^{\alpha} X_T(l) e^{-j2\pi l(d)} \quad (21)$$

$X(f, T)$, es la transformada de Fourier. La señal X_T es

observada en una ventana de tiempo t , es decir, $X(f, T)$ es la transformada de Fourier de la versión truncada de una señal x_t y la densidad espectral de potencia es esa transformada de Fourier de la señal truncada en el tiempo, de una magnitud elevada al cuadrado promediada en el tiempo, lo que se puede ver en la ecuación (22).

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} |x(f, T)|^2 \quad (22)$$

Y esta expresión es la que se llama periodograma, en otras palabras. Esta expresión gramatical está descrita en el párrafo anterior. En si un periodograma se acerca a la densidad espectral en la medida en que T tienda a infinito, lo que se ve en el miembro de la derecha de la ecuación (23).

$$S_x(f) = \frac{1}{2T} |x(f, T)|^2 \quad (23)$$

La función *prev* realiza los cálculos estadísticos básicos, genera el periodograma de la señal de salida, y permite de esta manera observar si la señal no ha sido afectada por la presencia del ruido. En la Figura H.4, se verifica la forma característica del periodograma propio de un filtro inductivo, Además, se observa que la señal ha sido bastante afectada por la presencia de ruido, ya que existe varios picos con diferentes frecuencias y amplitud, lo que sugiere el uso de filtros en las mediciones.

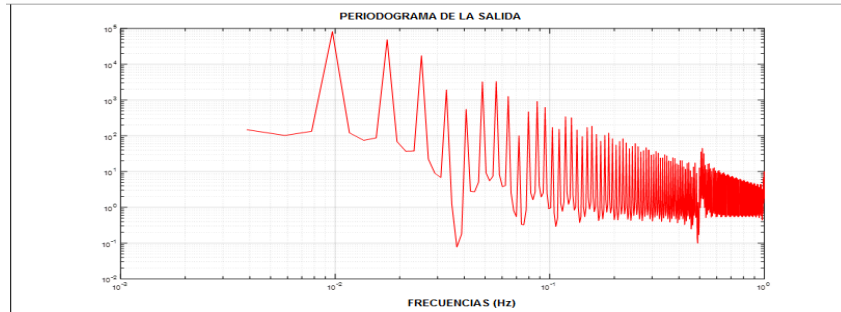


Figura H.4 Periodograma de la señal de salida, que permite conocer si existe presencia de ruido, Fuente: Autor.

Seguidamente se utiliza la función `idstrejc`, que utiliza el método de Strejc para identificar modelos lineales y continuos del tipo de la ecuación (24).

$$G(s) = \frac{K}{(Ts + 1)^n} \quad (24)$$

A partir de los datos recogidos en un experimento, donde se ha excitado al proceso con un paso escalón y muestra gráficamente las salidas simuladas, para lograr esto se utiliza la instrucción.

`[Num,Den,Fit,atm]=idstrejc(t,y,np,stp,km,tm)`, donde los términos `km` y `tm`, son solo usados para tiempo discreto.

`[Num,Den,Fit,atm]=idstrejc(t, PESO2, np, stp)`; a continuación se deben llenar estos, los puntos de inflexión, el vector tiempo definido anteriormente y el vector de salida.

Para este caso se pueden usar cualquiera de los tres puntos de inflexión, que serán usados para hallar el modelo. Se seleccionó el tercer punto de los que se muestran en la Figura H.5.

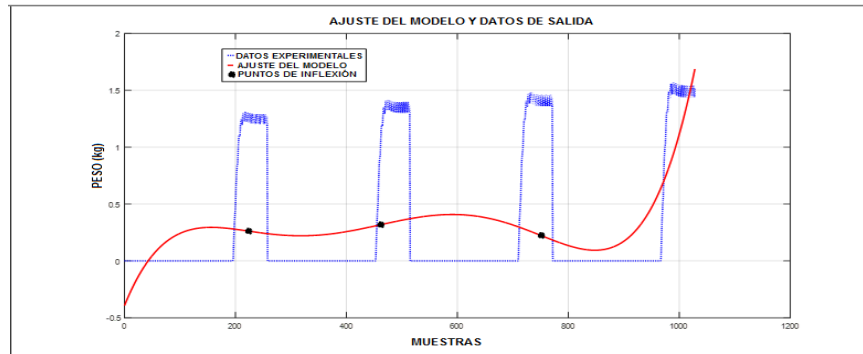


Figura H.5 Curva de ajuste, Fuente: Autor.

A continuación, debe entrar el vector de tiempos para la simulación: Señalándose así el tiempo t , que previamente se definió. Luego se indica el vector de mediciones para la simulación: Es decir, la salida que para este caso es PESO2.

En la Figura H.6 en la parte superior se muestran con el color azul los 1 024 experimentos y con el color rojo los datos simulados a través de los tres puntos de inflexión hallados previamente. Lográndose obtener ante un paso escalón de 1,6 de amplitud, valor elegido tomando en cuenta el máximo peso que se obtiene, cuando se cierra las placas de la trituradora, después que se trituran 2 kg de peso a la entrada. En la parte inferior de esta figura se presenta el error que debe ser igual o menor al 2,5% en prototipos a escala de laboratorio como el utilizado en este trabajo y del 5% en procesos reales (Fernández, 2012).

En la parte inferior de esta figura se puede apreciar el error del modelo que en los instantes de retardo de la banda transportadora es de 16 segundos y es muy bajo, pero es muy alto en los momentos en que se empieza a medir el peso.

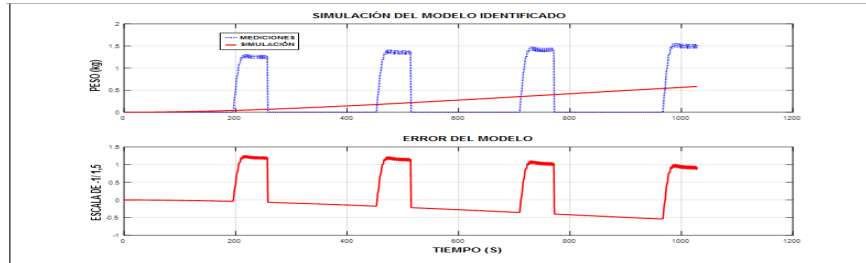


Figura H.6 Error hallado entre los datos medidos y los simulados, Fuente: Autor.

De esta forma la función de transferencia es de primer orden y tiene como entrada la posición en radianes y como salida el peso en kilogramos, como se muestra en la ecuación (25).

$$TF = \frac{\text{Peso (kg)}}{\text{Posición (Rad)}} = \frac{1,24 e^{-06}}{s^2 + 0,002519 s + 1,58 e^{-06}} \quad (25)$$

H.2 Uso de la herramienta CADCS empleando los primeros 256 datos hallados experimentales

Luego de haber ensayado y encontrado un modelo matemático que abarcó todos los experimentos, se pudo comprobar la existencia de un valor muy elevado del error, por lo que se procedió a realizar este análisis a cada uno de los experimentos, ya que la diferencia no variaba mayormente significativamente. Para esto, al igual que lo realizado anteriormente se cargan los primeros 256 datos.

De esta forma se puede apreciar en la Figura H.7 que se redujo la presencia de ruido, porque no se sumó el ruido de los 4

experimentos realizados para cada posición.

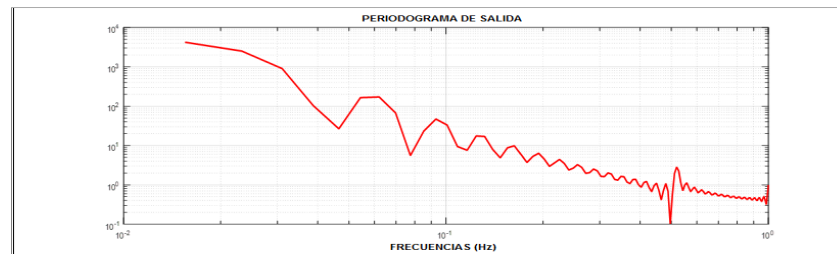


Figura H.7 Periodograma de la señal de salida de los primeros 256 datos, que permite conocer si existe presencia de ruido, Fuente: Autor.

Al aplicar la función `idstrejc`, para hallar los tres puntos de inflexión en el ajuste del modelo matemático se obtiene la Figura H.8.

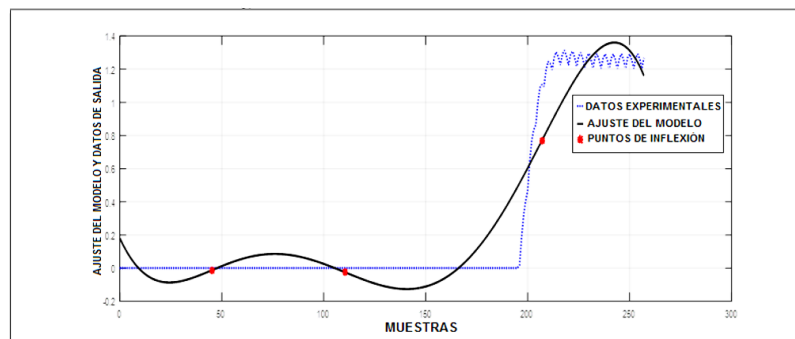


Figura H.8 Curva de ajuste de los primeros 256 datos, Fuente: Autor.

Igualmente, como se hizo con los 1 024 datos, seguidamente, en la Figura H.9 se muestra el error que se encontró entre los datos medidos y los simulados, notándose que se pudo reducir un poco más, pero no lo suficiente para ser aceptable.

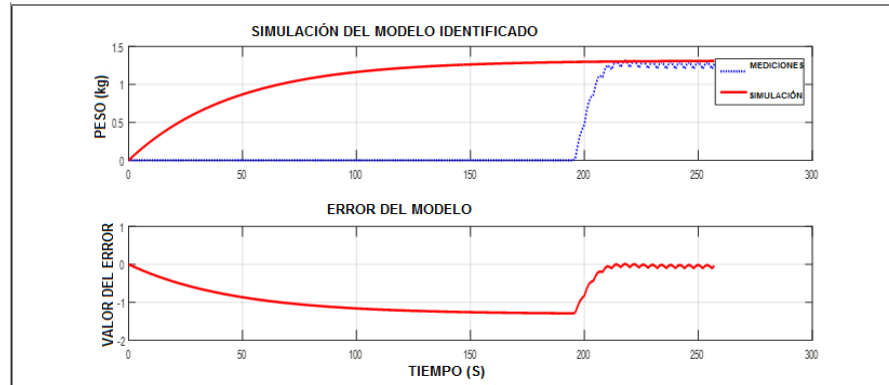


Figura H.9 Error hallado entre los datos medidos y los simulados, Fuente: Autor.

De esta forma el modelo hallado para nuestra trituradora se denomina PLA-TRI, que es nuestra función de transferencia de primer orden y tiene como entrada la posición en radianes y como salida el peso en kilogramos, como se muestra en la ecuación (26).

$$PLA - TRI = \frac{Peso (kg)}{Posición (Rad)} = \frac{0,6564}{47,55s + 1} \quad (26)$$

ANEXO I:

I.1: PROGRAMAS REALIZADO EN MATLAB®.PARA ENCONTRAR EL MODELO MATEMÁTICO DE LA TRITURADORA, USANDO LA HERRAMIENTA CADCS

%El siguiente programa permite conocer la calidad de los datos muestreados

%load TORQUE ENTRADA %Cargamos los datos de entrada

%load PESO SALIDA %Cargamos los datos de salida

y7=PESOSALIDA*0.02; % que es el resultado de la salida PESOSALIDA por 2% (0,02)

%representado en el eje de las y

t= [1:1:1 024]'; %El eje de las x, representa los 1 024 segundos por cada muestra

figure (1)

plot (t, PESOSALIDA)

nlags=10;

show=1;

dataprev=prev(t, TORQUE ENTRADA, PESOSALIDA, nlags, show)

np=5

figure (4)

```

[Num,Den,Fit,atm]=idstrejc(t, PESOSALIDA, np);

% 3

% t

% 5

[Num,Den,Fit,atm]=idstrejc(t, TORQUE ENTRADA,
PESOSALIDA, np);

```

I.2: EN EL QUE SE APLICA LA ESTRATEGIA DE CONTROL LQR A LA TRITURADORA

```

A= [-1000    0    0    0    0;
     0    -0.1806  0    0    1;
     4.16e08  0    -3.256e04  1.91e04  0;
     2.292e-07  0    0.04584  -1.05e-11  0;
     0    0    0    1    0];

B= [1 0 0;
     0 0 0;
     0 0 0;
     0 0 0;
     0 0 0];

C= [0    0    0    0    1;
     0    0.2298  0    0    0];

```

```

D= [0 0 0;
    0 0 0];

Plant = ss (A, B, C, D, Ts);

Plant.InputName =
{'PESOALPID','DISTURBIOI','DISTURBIOII'};

Plant.OutputName = {'POSICIÓN','PESO'};

Q = [0.4929    0    0    0    0;
     0    0.2008    0    0    0;
     0    0    0.00013    0    0;
     0    0    0    0.01189    0;
     0    0    0    0    0.0036];

R = [0.2088    0    0;
     0    0.0013    0;
     0    0    0.1184];

K=lqr (A, B, Q, R)

K1=K (1); K2=K (2); K3=K (3);

AA=A-B*K

BB=B*K1

CC=C

DD=D

t=0:0.01:100

```

```

[y,x,t]=step(AA,BB,CC,DD,1,t)

figure (1)

plot(t,y)

grid

title ('Fig 1 Respuesta escalón del sistema de control óptimo
cuadrático')

xlabel('tSeg')

ylabel ('Salida PESO')

disp ('Esta en pausa 1, vea Fig. 1, continúe con Enter')

pause

figure (2)

plot(t,x)

grid

%Estos son estados intermedios,

title ('Fig 2 Curvas de respuesta PESO, POSICION, PWM,
TORQUE PAP contra t')

ylabel ('PESO, POSICION, PWM, TORQUE PAP contra t')

text(10,33,'PESO')

text(3,2,'POSICION')

text (20,0.9,'PWM')

text (40,-1,'TORQUE PAP')

```

ColloQUIUM

Editorial - Centro de Formación

ISBN: 978-9942-600-07-3



9 789942 600073