



Diseño e implementación de un sistema de control automático para la producción de harina de trigo, orientado a la industria 4.0 y mediante la técnica Hardware In The Loop.

Casco Cabrera, Danny Paúl y Pérez Aldaz, Ronnie Damián

Departamento de Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio

22 de febrero del 2023

Latacunga

Reporte de verificación de contenido



Tesis_Casco_Pérez - CopyLeaks.docx
Scanned on: 6:0 February 22, 2023 UTC



	Word count
Identical	1126
Minor Changes	0
Paraphrased	0
Omitted	446

Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio
C.C: 0502651003



Departamento de Ciencias en Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: "Diseño e implementación de un sistema de control automático para la producción de harina de trigo, orientado a la industria 4.0 y mediante la técnica Hardware In The Loop." fue realizado por los señores Casco Cabrera, Danny Paúl y Pérez Aldaz, Ronnie Damián; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 22 de febrero del 2023

Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio

C.C: 0502651003



Departamento de Ciencias en Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Auditoría

Nosotros, **Casco Cabrera, Danny Paúl y Pérez Aldaz, Ronnie Damián**, con cédulas de ciudadanía n° 1751425198 y 1804775128, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "Diseño e implementación de un sistema de control automático para la producción de harina de trigo, orientado a la industria 4.0 y mediante la técnica Hardware In The Loop.", es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 22 de febrero del 2023

Casco Cabrera, Danny Paúl

C.C: 1751425198

Pérez Aldaz, Ronnie Damián

C.C: 1804775128



Departamento de Ciencias Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotros Casco Cabrera, Danny Paúl y Pérez Aldaz, Ronnie Damián, con cédulas de ciudadanía n° 1751425198 y 1804775128, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "Diseño e implementación de un sistema de control automático para la producción de harina de trigo, orientado a la industria 4.0 y mediante la técnica Hardware In The Loop." en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 22 de febrero del 2023

Casco Cabrera, Danny Paúl

C.C: 1751425198

Pérez Aldaz, Ronnie Damián

C.C: 1804775128

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada:

A Dios quien ha sido mi guía, fortaleza y su mano de fidelidad y amor han estado conmigo hasta el día de hoy.

A mis padres Elizabeth y Enrique por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí. Gracias por sus consejos y ejemplo a seguir. Esta tesis y todo lo que logre hacer será gracias a la fortaleza, virtudes y valores inculcados en mí.

A mi hija Eli, quien es lo más importante en mi vida, hoy he dado un paso más para servir de ejemplo a la persona que más amo en este mundo. Gracias a ti he decidido subir un escalón más y crecer como persona y profesional. Espero que un día comprendas que te debo lo que soy ahora y que este logro sirva de herramienta para guiar cada uno de tus pasos.

Pérez Aldaz, Ronnie Damián

Dedicatoria

Este objetivo en particular la dedico a la Ciencia y todos entusiastas ingenieros que buscan conocimiento con el fin de ayudar a fomentar una sociedad libre, inteligente y sobre todo con Valores. Dedico además a mi querida familia mecatrónica, e intento inspirarlos a fortalecer sus aptitudes y su pasión por la ciencia.

Sobre todo, estaré agradecido con mi familia cercana, las cuales siempre han estado apoyándome directa o indirectamente a lo largo de mi formación académica, y como las palabras no representa el mismo valor que las acciones, solamente me queda presentar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que he conocido en el trayecto de mi formación, ya que, gracias a todas ellas, se ha formado mi personalidad.

Casco Cabrera, Danny Paúl

Agradecimiento

A mis padres Elizabeth y Enrique que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades. También son los que me han brindado el soporte material y económico para poder concentrarme en los estudios y nunca abandonarlos.

A Eli quien es mi mayor tesoro y también la fuente más pura de mi inspiración; por eso quiero agradecerte cada momento de felicidad con el que colmas mi vida. Te doy las gracias, hija mía, por darle sentido a mi vida.

A mi Tutor de tesis, quien desde el primer momento me brindó su amistad, su bondad, y fue de gran apoyo.

Pérez Aldaz, Ronnie Damián

Agradecimiento

Agradezco a la suerte y la vida, por permitirme experimentar esta etapa de la vida, de la cual he sabido sacar provecho y no darme por vencido sin importar cuan dura sea la prueba. Siempre estaré agradecido con todas las personas que llegaron a formar parte de mi camino y mucho más con las que decidieron quedarse.

Casco Cabrera, Danny Paúl

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenido	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento	8
Agradecimiento	9
Índice de contenido.....	10
Índice de figuras.....	16
Índice de tablas.....	20
Resumen	21
Abstract.....	22
Capítulo I: Fundamentos Teóricos.....	23
Antecedentes	23
Planteamiento del Problema	25
Objetivos	26

	11
<i>Objetivo General</i>	26
<i>Objetivo Especifico</i>	26
Justificación e Importancia	27
Hipótesis.....	28
Variables.....	29
<i>Variable Independiente</i>	29
<i>Variables Dependientes</i>	29
Capítulo II: Estado del Arte.....	30
Proceso productivo de la harina.....	30
Técnica hardware in the loop	31
Beneficios del HIL.....	32
Control avanzado	33
Tipos de controladores	33
<i>Control difuso</i>	34
<i>Control predictivo por modelo</i>	34
<i>Control PID</i>	35
<i>Control neuronal</i>	36
<i>Entorno virtual</i>	36
Aplicaciones de los entornos virtuales.....	36
<i>Entrenamiento militar</i>	36

<i>Cine</i>	37
<i>Simulador de vuelo</i>	37
<i>NASA</i>	37
<i>Videojuegos</i>	37
Robótica en la industria	38
<i>Tipos de automatización de los robots industriales</i>	38
Aplicaciones y usos de los robots en la industria	39
<i>HMI</i>	39
<i>Ventajas del uso de HMI</i>	40
Tipos de HMI	40
<i>HMI de alto rendimiento</i>	40
<i>Monitoreo remoto</i>	40
<i>HMI de red y de cloud</i>	41
Internet de las cosas	41
<i>Ventajas del IoT</i>	42
Cinemática del robot	42
Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemático directo	43
Pasos para la obtención del modelo cinemático directo	43
Capítulo III: Diseño del sistema de control automático	46
Identificación de secuencias de funcionamiento del proceso	47

<i>Primera Etapa (Molienda)</i>	48
<i>Segunda Etapa (Llenado de sacos)</i>	49
<i>Tercera Etapa (Transporte de sacos)</i>	50
<i>Cuarta Etapa (Paletizado y distribución)</i>	51
Obtención de los modelos matemáticos de los componentes del sistema	52
<i>Obtención del modelo matemático del brazo robótico de 6GDL</i>	52
Automatización de los procesos y subprocesos para la obtención de harina	55
<i>Procesos y subprocesos a realizar para la obtención de harina</i>	55
Programación del PLC para la automatización de las etapas del proceso de producción de harina.....	57
<i>Molienda</i>	57
Extracción de impurezas	59
Llenado de sacos	59
Bandas transportadoras	60
Paletizado	61
Diseño de controladores.....	62
<i>Diseño del control para el brazo robótico mimo de 6GDL</i>	62
Evaluación del comportamiento de los errores de control para el brazo robótico	64
<i>Controlador PID para la etapa de Molienda</i>	66
Diseño entorno virtual mediante el software Unity 3D	66
<i>Diseño del entorno virtual para el proceso de paletizado</i>	70

Selección del brazo robótico físico y determinación de elementos eléctricos para el brazo robótico físico y la banda transportadora.....	72
<i>Selección del brazo robótico</i>	73
<i>Servomotor TD-8120MG.....</i>	74
<i>Diseño placa PBC convertidor BUCK DC-DC.....</i>	75
<i>Diseño placa PCB convertidor DC-DC.....</i>	79
<i>Carga total de trabajo.....</i>	81
<i>Selección del Diodo</i>	82
<i>Selección del MOSFET.....</i>	83
<i>Especificaciones</i>	84
<i>Características eléctricas</i>	84
<i>Esquemático de conexión para microcontrolador</i>	87
<i>Conexión de Servomotores del brazo robótico SNAM 6900</i>	88
Evaluación del comportamiento de los errores de control de procesos y subprocesos	88
Diseño del HMI (Human Machine Interface)	91
Creación de entorno mediante Node-Red.	93
Comunicación.....	95
<i>Cliente 1</i>	98
<i>Cliente 2</i>	99
<i>Cliente 3 y 4</i>	101
<i>Server</i>	101

<i>Configuración KEPSERVER</i>	103
Pruebas de funcionamiento.....	104
Curvas de respuesta del controlador del brazo robótico	105
<i>Pruebas de carga para la placa PCB.....</i>	107
<i>Tiempo de molienda para trituración del material</i>	109
<i>Tiempo de apertura y cierre de las válvulas de salida de silos.</i>	111
<i>Tiempo de paletizado físico vs simulado</i>	113
<i>Pruebas de ubicación del brazo robótico.</i>	115
Pruebas de comunicación entre Unity 3D y PLC S71200 AC/DC/RLY	122
Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones	124
Conclusiones.....	124
Recomendaciones	125
Bibliografía	127
Anexos	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Tipos de controladores avanzados</i>	34
Figura 2 <i>Controlador PID</i>	35
Figura 3 <i>Conexión WebServer</i>	41
Figura 4 <i>Parámetros D-H para un eslabón giratorio</i>	45
Figura 5 <i>Diagrama de comunicación entorno virtual - físico</i>	47
Figura 6 <i>Secuencias de funcionamiento del proceso</i>	48
Figura 7 <i>Secuencia de la molienda</i>	49
Figura 8 <i>Secuencia del llenado</i>	50
Figura 9 <i>Secuencia de transporte</i>	50
Figura 10 <i>Secuencia de paletizado</i>	51
Figura 11 <i>Parámetros y características para modelo DH.</i>	52
Figura 12 <i>Movimiento de eslabones del brazo robótico de 6GDL</i>	54
Figura 13 <i>Esquema del proceso de obtención de harina</i>	56
Figura 14 <i>Diagrama Grafcet para el proceso de producción de harina.</i>	57
Figura 15 <i>Control Molienda</i>	58
Figura 16 <i>Grafcet extracción de impurezas.</i>	59
Figura 17 <i>Control llenado de sacos</i>	60
Figura 18 <i>Control llenado de bandas transportadoras</i>	61
Figura 19 <i>Definición de eslabones en MatLab</i>	62
Figura 20 <i>Valores obtenidos para cada uno de los eslabones</i>	63
Figura 21 <i>Matriz real de parámetro Denavit Hartenberg</i>	63
Figura 22 <i>Valores del vector ingresado</i>	64
Figura 23 <i>Valores del vector ingresado</i>	64

Figura 24 <i>Posición inicial brazo robótico</i>	65
Figura 25 <i>Posición final brazo robótico</i>	65
Figura 26 <i>Configuración del Bloque PID. Entradas y Salidas de las variables</i>	66
Figura 27 <i>Configuración parámetros del PD</i>	66
Figura 28 <i>Exterior del entorno virtual</i>	67
Figura 29 <i>Exterior del entorno virtual</i>	68
Figura 30 <i>Creación del entorno virtual</i>	68
Figura 31 <i>Entorno para bandas transportadoras</i>	69
Figura 32 <i>Área de almacenamiento</i>	69
Figura 33 <i>Diseño del entorno virtual para la etapa de paletizado</i>	70
Figura 34 <i>Banda transportadora y robot</i>	71
Figura 35 <i>Componentes I/O y alimentación</i>	71
Figura 36 <i>Zona de paletizado</i>	72
Figura 37 <i>Brazo robótico SNAM 6900</i>	73
Figura 38 <i>Dimensiones del Brazo robótico SNAM 6900</i>	74
Figura 39 <i>Servo motor TD-8120MG</i>	74
Figura 40 <i>Diagrama universal Convertidor Buck DC-DC</i>	76
Figura 41 <i>Formas de onda de corriente y voltaje de un convertidor Buck DC-DC</i>	76
Figura 42 <i>Esquemático Convertidor Buck DC-DC</i>	79
Figura 43 <i>Diodo WNS30H100C</i>	83
Figura 44 <i>MOSFET IRF3205</i>	83
Figura 45 <i>Esquemático Convertidor DC-DC</i>	85
Figura 46 <i>Vista de pistas para la placa PCB del Convertidor DC-DC</i>	86
Figura 47 <i>Vista de la placa frontal</i>	86

Figura 48 <i>Vista 3D de la placa con los elementos colocados</i>	87
Figura 49 <i>Conexión microcontroladores.</i>	87
Figura 50 <i>Diagrama de conexión servomotores</i>	88
Figura 51 <i>Silos y Molienda</i>	89
Figura 52 <i>Bandas transportadoras</i>	90
Figura 53 <i>Paletizado</i>	91
Figura 54 <i>Pantalla de Inicio</i>	91
Figura 55 <i>Silo de almacenamiento y proceso de molienda</i>	92
Figura 56 <i>Extracción de impurezas y almacenamiento para llenado</i>	92
Figura 57 <i>Almacenamiento final y llenado de sacos.</i>	93
Figura 58 <i>Programación en Node-Red</i>	94
Figura 59 <i>Comunicación con cada tag de los procesos de los procesos</i>	94
Figura 60 <i>Lectura de datos y layout diseñado en Node-red</i>	95
Figura 61 <i>Diagrama de comunicación Controlador-Proceso industrial</i>	96
Figura 62 <i>Red sistema SCADA</i>	97
Figura 63 <i>Red sistema SCADA en Tia Portal</i>	98
Figura 64 <i>Bloque de comunicación Modbus</i>	99
Figura 65 <i>DB de los datos del cliente 1</i>	99
Figura 66 <i>Bloque de datos Client 2</i>	100
Figura 67 <i>DB de los datos del Cliente 2</i>	100
Figura 68 <i>Configuración del bloque MB_Client</i>	100
Figura 69 <i>DB de los datos del Cliente 3</i>	101
Figura 70 <i>DB de los datos del Cliente 4</i>	101
Figura 71 <i>Bloque de Datos (DB) del Server</i>	102

Figura 72 <i>Bloque de comunicación Modbus-Cliente 2</i>	102
Figura 73 <i>Bloque de comunicación Modbus Cliente 3</i>	103
Figura 74 <i>Configuración KEPSERVER</i>	103
Figura 75 <i>Configuración de tags</i>	104
Figura 76 <i>Configuración entre KEPSERVER y Nextion Editor</i>	104
Figura 77 <i>Posición final brazo robótico</i>	105
Figura 78 <i>Evaluación de errores de control</i>	106
Figura 79 <i>Pruebas de carga</i>	107
Figura 80 <i>Prueba de funcionamiento de molienda</i>	109
Figura 81 <i>Prueba de funcionamiento apertura y cierre de válvulas</i>	111
Figura 82 <i>Prueba de funcionamiento tiempo de paletizado</i>	113
Figura 83 <i>Prueba de funcionamiento ubicación del brazo robótico</i>	115
Figura 84 <i>Prueba de funcionamiento para el movimiento del robot</i>	116
Figura 85 <i>Movimiento de la primera articulación</i>	117
Figura 86 <i>Movimiento tercera articulación</i>	118
Figura 87 <i>Movimiento de cuarta articulación</i>	119
Figura 88 <i>Movimiento de la quinta articulación</i>	120
Figura 89 <i>Movimiento de la sexta articulación</i>	121
Figura 90 <i>Comunicación entre Unity 3D y PLC S7 1200</i>	122
Figura 91 <i>Pruebas comunicación IoT y HMI</i>	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Parámetros D-H para el brazo robótico de 6GDL</i>	55
Tabla 2 <i>Especificaciones servo motor TD-8120MG</i>	75
Tabla 3 <i>Cálculos carga total</i>	82
Tabla 4 <i>Direcciones IP de cada cliente</i>	97
Tabla 5 <i>Pruebas de carga</i>	108
Tabla 6 <i>Tiempo de molienda del material</i>	110
Tabla 7 <i>Tiempo de molienda del material</i>	112
Tabla 8 <i>Tiempo de paletizado</i>	114
Tabla 9 <i>Movimiento primera articulación 45°</i>	115
Tabla 10 <i>Movimiento segunda articulación 45°</i>	117
Tabla 11 <i>Movimiento tercera articulación 45°</i>	118
Tabla 12 <i>Movimiento cuarta articulación 45°</i>	119
Tabla 13 <i>Movimiento quinta articulación 45°</i>	120
Tabla 14 <i>Movimiento sexta articulación 45°</i>	121

Resumen

El presente trabajo de titulación contempla el diseño e implementación de un sistema de control automático para la producción de harina de trigo, orientado a la industria 4.0 y mediante la técnica Hardware in The Loop, por medio de investigación se estableció las etapas por las cuales estará formado el proceso de producción, una vez establecidas las etapas, se obtuvo los modelos matemáticos necesarios para los componentes del sistema, es decir para el brazo robótico de 6 grados de libertad. Luego se realizó la programación para la automatización de cada proceso y subproceso que se encuentra dentro de la planta de producción, se realizó el diseño del controlador con el que trabajará el brazo robótico, se obtuvo los parámetros para la configuración del controlador PID en la etapa de la molienda. Para el diseño del entorno virtual 3D se tuvo en cuenta cada uno de los procesos y subprocesos, ya que todos están dentro de dicho entorno, permitiendo simular un ambiente lo más cercano a la realidad, se procedió a seleccionar el brazo robótico con el que se trabaja en la parte física, por lo cual se determinó los elementos eléctricos que eran necesarios, diseñando así una placa PCB para asegurar el correcto funcionamiento de toda la parte física, teniendo en cuenta que la comunicación es de vital importancia entre el controlador y el proceso industrial, por lo que se hizo uso de la comunicación ethernet industrial entre el software utilizado para el entorno virtual y los controladores del proceso para poder simular tanto sensores como actuadores en tiempo real, para facilitar la comunicación con el usuario se desarrolló un HMI, con el cual se podrá monitorear los procesos dentro de la planta, se diseñó una interfaz gráfica en HTML para poder realizar la comunicación IoT de toda la planta.

Palabras clave: automatización mecatrónica, entorno virtual 3D, comunicación IoT, brazo robótico.

Abstract

This degree work contemplates the design and implementation of an automatic control system for the production of wheat flour, oriented to the industry 4.0 and through the Hardware in The Loop technique, by means of research the stages by which the production process will be formed were established, once the stages were established, the necessary mathematical models were obtained for the components of the system, that is to say for the robotic arm of 6 degrees of freedom. Then the programming for the automation of each process and sub-process within the production plant was carried out, the design of the controller with which the robotic arm will work was made, and the parameters for the configuration of the PID controller in the milling stage were obtained. For the design of the 3D virtual environment, each of the processes and sub-processes were taken into account, since they are all within this environment, allowing to simulate an environment as close to reality, we proceeded to select the robotic arm with which we work in the physical part, for which we determined the electrical elements that were necessary, thus designing a PCB board to ensure the proper functioning of the entire physical part, Taking into account that communication is of vital importance between the controller and the industrial process, so we made use of industrial ethernet communication between the software used for the virtual environment and process controllers to simulate both sensors and actuators in real time, to facilitate communication with the user an HMI was developed, with which you can monitor the processes within the plant, a graphical interface was designed in HTML to perform IoT communication of the entire plant.

Keywords: mechatronic automation, 3D virtual environment, IoT communication, robotic arm.

Capítulo I

Fundamentos Teóricos

Antecedentes

En la actualidad en Ecuador, las provincias con una mayor producción de trigo son: Bolívar, Chimborazo, Cotopaxi, Imbabura y Carchi, generando aproximadamente el 2% de trigo dentro del país, las mismas que no abastecen a la demanda. La industria molinera en el año 2014 importó 624000 toneladas de trigo con la finalidad de abastecer a las productoras de fideos, galletas y pan en nuestro país. De acuerdo con la Asociación Ecuatoriana de Molineros (Asemol) cada año va en aumento la demanda de trigo en un 2% - 3% (Moreta, 2015) Teniendo en cuenta que de cada tonelada de trigo molido el 78% es harina; para la obtención de la harina el trigo pasa por varias etapas, tales como la selección, dentro de la cual el trigo entra a varias pruebas para encontrar impurezas, tipo de trigo, etc.; luego pasa a limpieza, en donde se elimina desde elementos metálicos hasta lo más pequeño como residuos de polvo, para pasar a la etapa de acondicionamiento al trigo se le añade agua y se lo deja en reposo por un tiempo máximo de 24 horas y mínimo de 6 horas, con esto se logra una separación más limpia y se mejora el estado del grano, para posteriormente pasar a la etapa de molienda, una vez molido el producto debe pasar por procesos que garanticen su calidad, pasando así a la sección final donde se empaca y traslada a la estación de paletizado, donde por medio de brazos robóticos que se encontrarán en dicha estación, se procederá a colocar cada uno de los sacos de harina que tienen un peso específico en su pallet correspondiente, hasta llegar a un número determinado de sacos en el pallet.

Los sistemas de control automático permiten reducir los costos asociados a la generación de bienes y servicios. Asimismo, mejoran la calidad y los volúmenes de producción de las plantas industriales, lo que permite ahorrar tiempo y optimizar el control de los procesos (Noguera, 2020).

Los sistemas de control automático son un conjunto de técnicas que permiten implantar estrategias para mantener condiciones físicas, o cantidades de variables medibles en valores deseados. El estudio de los sistemas de control automático tiene como objetivo evolucionar y tecnificar las tecnologías para el control industrial. Sobre todo, la industria alimenticia que contiene un nivel elevado de automatización industrial, dichos avances significan la sustitución de algunas tareas manuales específicas. Sin embargo, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, se ha confirmado que, conforme aumenta la automatización industrial alimentaria, los procesadores de alimentos proporcionan empleo a trabajadores con mayores cualificaciones para accionar las máquinas (Tomra, 2016).

Para la producción de harina de trigo es de gran importancia el control automático ya que permite mayor producción, mejor calidad del producto y menor costo, para ello es necesario automatizar las etapas del proceso, así como programar los brazos robóticos para las tareas de paletizado, con esto se puede llegar a reducir la intervención humana en áreas peligrosas, y a la vez se puede llegar a corregir posibles errores que puedan presentarse.

En el contexto de control automático en la actualidad existe la técnica Hardware in The Loop, en la que las señales reales de un controlador son conectadas a un sistema de pruebas que simula la realidad, engañando al controlador para que piense que está en el producto ensamblado. La prueba y la iteración del diseño se realiza como si se estuviera utilizando el sistema del mundo real. Se puede ejecutar fácilmente miles de escenarios posibles para poner en práctica al controlador sin el costo y el tiempo asociados a lo que conlleva las pruebas físicas de la actualidad (National Instruments, 2020). Para las cuales se puede usar diferentes controladores a fin de determinar las características necesarias y simular en un entorno virtual antes de ser implementado en el campo práctico.

En la actualidad con la introducción de la industria 4.0 es necesario que las variables de interés de los procesos industriales estén a disposición de los profesionales en el área de automatización, por lo cual existe un área en las empresas denominada Supervisión y control, la misma que a nivel jerárquico superior se denomina MES y ERP que hace referencia a la industria 4.0. Además, que el Internet de las Cosas proporciona una mejor visibilidad y conocimiento de las operaciones y los activos de una empresa por medio de la integración de sensores de máquina, programas de software, sistemas de computación y almacenamiento en la nube. Las herramientas de IoT son componentes tecnológicos que permiten a un producto o máquina de producción conectarse a una red corporativa, para que recolecte y comparta datos. Las más utilizadas son los sensores, cuyo objetivo es capturar el ambiente externo de un objeto (Galileo, 2019).

Planteamiento del Problema

En nuestro país la producción de harina es una industria muy importante, ya que de ella se obtienen productos de primera necesidad para las familias ecuatorianas, por lo cual es conveniente que el futuro ingeniero mecatrónico adquiera conocimiento en el proceso de automatización en la elaboración de harina de trigo. En la actualidad el acceder al entrenamiento en plantas industriales para la fabricación de la harina es difícil porque se encuentran en funcionamiento continuo y el acceso es restringido únicamente al personal autorizado, así como también el adquirir prototipos para el entrenamiento representa un alto costo.

Por lo cual es importante para el futuro profesional tener el conocimiento necesario para automatizar procesos industriales como el mencionado o similares, adquiriendo destrezas y habilidades, ya que estos ingenieros tendrán la capacidad de aplicar sus conocimientos en equipos y sistemas de última generación utilizados en los diferentes sectores de la industria, brindando rapidez y precisión en las tareas a realizar.

Actualmente el 98% del grano de trigo que se muele en nuestro país es importado desde Canadá y EE.UU, con estas importaciones se ha logrado generar una empleabilidad de manera directa e indirecta dentro del país, generando así 24000 puestos de trabajo, sabiendo que la demanda anual de este producto va en aumento entre un 2% - 3%, esta empleabilidad podría incrementar con el paso del tiempo, por lo cual los grandes productores podrían llegar a optar por mejorar sus tiempos en la producción, dando paso a la industria 4.0 automatizando el proceso de producción, pudiendo con esto mejorar incluso la calidad del producto. Considerando que existe mucha importación de harina es necesario aumentar la producción local. (Moreta, 2015).

Objetivos

Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de control automático para la producción de harina de trigo, orientado a la industria 4.0 y mediante la técnica Hardware In The Loop.

Objetivo Específico

- Determinar el modelo matemático y secuencias de funcionamiento de las etapas: molienda, llenado y transportación para la producción de harina de trigo e investigar en bases de datos científicas el método de parámetros DH (Denavit Hartenberg).
- Plantear los algoritmos de control para los procesos y subprocesos de las etapas molienda, llenado y transportación para la producción de harina de trigo, y plantear el algoritmo de control avanzado MIMO.
- Desarrollar el entorno virtual inmersivo e interactivo para el usuario.
- Diseñar e implementar la instrumentación (sensores, actuadores, etc.) necesaria para el funcionamiento de los procesos dentro de la producción de harina de trigo.

- Implementar el control automático del proceso mediante la técnica de Hardware in the loop.
- Analizar la estabilidad y robustez del esquema de control propuesto.
- Desarrollar un servidor web para la plataforma IoT del proceso de producción de harina de trigo.
- Evaluar el desempeño del sistema de control implementado con la técnica Hardware in the loop.

Justificación e Importancia

Actualmente el profesional en Ingeniería Mecatrónica está capacitado para poder diseñar, crear, implementar y mantener sistemas mecatrónicos en de los diferentes sectores dentro de la industria, por lo que el ingeniero mecatrónico adquiere conocimientos y habilidades con la finalidad de aplicarlos, logrando con estos equipos la automatización, cambiando la producción dentro de las empresas. En la actualidad la industria 4.0 está avanzando a pasos agigantados alrededor del mundo, con lo cual se ha logrado automatizar grandes procesos, sin embargo, en la industria del país no está muy presente, ya sea por sus altos costos de inversión o por falta de conocimiento. Los profesionales de la carrera de ingeniería mecatrónica se forman para proporcionar soluciones actuales en automatización (industria 4.0) para los procesos de producción, con la ayuda de la sinergia de la ingeniería mecánica, electrónica y de control, con lo cual se puede crear, implementar y operar equipos del sector industrial, logrando así una gran reducción de costos

Con esto se puede llegar a optar por la implementación de automatización para distintos procesos dentro de las diferentes industrias, logrando así estar a la vanguardia de la tecnología, mejorando los productos finales e incrementando así su producción, lo cual generará mayores ingresos, al llevar este proceso a la industria 4.0 se mejora la forma de comunicación entre el operador y los datos obtenidos, para esto tenemos sensores y actuadores inteligentes que ayudan a

la mejora de los procesos, con lo cual se aprovechan las capacidades de las máquinas utilizadas ya que la información se transmite en tiempo real y se la pueda utilizar en tomas de decisiones a futuro.

Al trabajar con IoT, se va a observar una optimización y mayor eficiencia en cada procesos y subprocesos, incluso se puede llegar a trabajar con mayor precisión ayudando a llevar una buena monitorización del desarrollo del producto, esto a su vez facilita el trabajo de los técnicos, ya que tendrán toda la información necesaria en tiempo real para saber sí el proceso se ha visto afectado o existe daños en alguno de los equipos, y la razón de estos.

Teniendo en cuenta que la mayoría de industrias automatizadas hoy en día cuentan con brazos robóticos, se los utiliza para diversas aplicaciones, tales como: pintura, soldadura, empaquetado, paletizado, montaje, pulido, etc., son usados para realizar tareas específicas, repetitivas, tareas peligrosas para el ser humano, etc., al mismo tiempo que facilita el trabajo de las personas y evita accidentes laborales relacionados con cargas altas de peso; en este caso se lo encontrará realizando la tarea de paletizado de los sacos de harina, la misma que estará en la parte final del proceso industrial, para lo cual se debe tener en cuenta que es importante saber todo en relación a la cinemática del robot, para poder conocer el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia; por otro lado la dinámica del robot es importante ya que el modelado matemático que se llegará a obtener del robot ayudará a conocer la relación entre los movimientos que puede llegar a realizar el robot y las fuerzas que están implicadas con los mismos, con esto se podrá controlar el robot y lograr que este realice la tarea que se desee.

Hipótesis

¿Es posible implementar algoritmos de control mediante la técnica de Hardware in the loop, HIL, para el control automático de la producción de harina de trigo orientando el proceso a la industria 4.0?

Variables***Variable Independiente***

Modelo matemático del brazo robótico de 6 grados de libertad en el proceso de paletizado, modelo matemático y secuencias de funcionamiento de las etapas: molienda, llenado y transportación para la producción de harina de trigo.

Variables Dependientes

Algoritmo de control del brazo robótico de 6 grados de libertad.

Algoritmo de control del proceso de producción de harina de trigo.

Capítulo II

Estado del Arte

Proceso productivo de la harina

Si bien el proceso de molturación de trigo blando ha registrado diversas mejoras tecnológicas en los últimos años enfocadas a conseguir una mayor productividad en la obtención de harinas, así como un mejor cumplimiento de las diferentes normativas que regulan esta actividad (seguridad e higiene alimentaria, medio ambiente y prevención de riesgos laborales, principalmente), el proceso en sí mismo y la tecnología básica de la industria harinera no ha registrado apenas cambios esenciales en las últimas décadas. Este es uno de los rasgos tecnológicos característicos de la industria harinera en todo el mundo (AFHSE, 2009).

El proceso productivo de la harina empieza con el almacenamiento del trigo en silos y depósitos de cereales para su posterior transporte, el mismo que se realiza de manera vertical y horizontal dependiendo de las máquinas y depósitos; lo siguiente es la limpieza del trigo, que consiste en separar los materiales extraños, para lo que se utiliza una máquina de separación de impurezas por aspiración como: cribas horizontales, deschinadoras (clasifica y separa las piedras del grano a ser procesado), separadores centrífugos y magnéticos, cepilladoras o despuntadoras.

Lo siguiente es adicionar cierta cantidad de agua, de tal manera que se incremente su humedad uniformemente con la finalidad de mejorar el comportamiento tecnológico durante el proceso de molido, la adición correcta de agua ayuda a separar con facilidad las cubiertas externas e incrementar el rendimiento en harinas y disminuir el gasto de energía en el proceso, luego de añadir el agua se requiere un tiempo de reposo entre 6 y 24 horas según la variedad del trigo.

Lo siguiente es la molienda, aquí se separa el salvado de la almendra harinosa endospermo y reducción de gránulos finos, se tiene diferentes procesos de triturado, raspado y compresión

mediante cilindros de molino, que generan diferentes tamaños de partículas que pasan a cernedores.

Entre los sistemas utilizados están:

- Trituración: separa el endospermo de salvado y germen.
- Desagregación: romper grandes trozos de endospermo
- Compresión: reduce pequeños fragmentos de endospermo a harina
- Colas: separa la fibra del endospermo de los 3 sistemas anteriores.

La harina tiene un pigmento amarillo compuesto por 95% de Xantofila, para lo cual se realiza un proceso de blanqueo natural del endospermo de trigo por oxidación, la cual se produce al exponer la harina al aire, pero también se puede acelerar el proceso mediante químicos.

Una vez obtenida la harina, se la debe someter a diferentes ensayos analíticos, físico-químicos y microbiológicos, con lo que se garantiza su homogeneidad, calidad y cumplimiento de especificaciones.

Finalmente, el producto se empaqueta en bultos de polipropileno con lo cual se protege el producto de la humedad, de microorganismos, insectos durante su almacenamiento. (Consulting, 2009)

Técnica hardware in the loop

En la actualidad la gran capacidad de los ordenadores ha permitido que la simulación sea una gran herramienta con gran demanda, ya que permite comprobar y evaluar diseños sin tener que acceder a los altos costos de realizar pruebas físicas

Probar algoritmos de control puede llevar mucho tiempo, ser costoso y potencialmente inseguro si se decide probar con el sistema real. Para seguir siendo competitivos y ofrecer software

de controlador de alta calidad, se han reemplazado los métodos de prueba tradicionales con pruebas de hardware en el bucle (HIL).

Las pruebas de hardware in the loop le permiten verificar el diseño del controlador sin el hardware completo del sistema. Confíe en un simulador de planta en tiempo real que actúa como un gemelo digital de todo el sistema o partes del sistema para beneficiarse de la practicidad y reducir los costos (Bacic, 2005).

Beneficios del HIL

La técnica HIL permite que las señales del controlador puedan ser conectada a un sistema que simula la realidad, haciendo que el controlador crea que se lo está realizando en realidad, el HIL permite utilizar diferentes escenarios para probar el controlador ante todas las posibles situaciones que se puedan generar, todo esto de una manera segura.

- **Reducción de costos:** debido a que no será necesaria su implementación en la realidad, este costo se ve reducido ya que realizar pruebas en una planta es costoso.
- **Tiempo de desarrollo:** al tener la facilidad de tener la planta virtual, se puede realizar el desarrollo paralelo del controlador y las pruebas, disminuyendo el tiempo que se tardaría en realizarlo de manera convencional.
- **Seguridad:** ya que se está trabajando con simulaciones, al realizar las pruebas no se corre ningún tipo de riesgo que podría conllevar el realizar pruebas en casos críticos.
- **Planta 3D:** se puede tener la representación 3D de la planta, lo cual nos permite apreciar todo el entorno e incluso poder generar perturbaciones que puede haber en la realidad.

Control avanzado

El control avanzado describe el diseño de una infraestructura de un sistema de ingeniería que reúne elementos de diferentes disciplinas, desde ingeniería de control, procesamiento de señales, estadística, teorías de decisión, ingeniería de software, hasta técnicas de inteligencia artificial. Son utilizados en procesos que por su grado de complejidad no pueden ser operados usando técnicas de control convencional de forma eficiente, y requieren aplicar técnicas de control avanzado para alcanzar las prestaciones deseadas (Frutos, 2015).

Beneficios del Control Avanzado

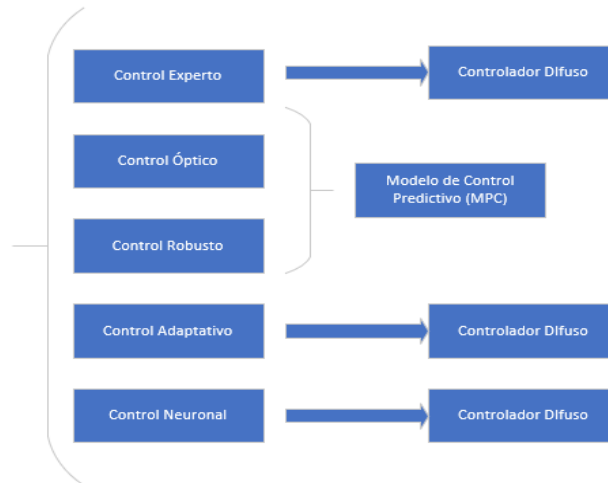
- Incremento de la productividad
- Reducción del consumo de energía
- Incremento de la capacidad de producción
- Mejora en la calidad de la producción

Tipos de controladores

Existen varias maneras de realizar el control que responden a esta clasificación, sin embargo, la dificultad para poder ser operadas por personal con escaso nivel de formación profesional, así como para generalizarlas a sistemas de diferente naturaleza, ha provocado que pocas sean las que han trascendido del ámbito académico al industrial. Se hace referencia a los controles más importantes en cuanto a la utilización y aplicación industrial:

Figura 1

Tipos de controladores avanzados



Nota. La figura representa los diferentes tipos de controladores avanzados existentes, de los cuales se elegirá para trabajar. Tomado de (Vaca, 2015)

Control difuso

Lo que se quiere realizar con este tipo de control es establecer de manera lógica lo que se debe hacer para obtener los mejores resultados con el control, iniciando con datos proporcionados por el usuario, sin esto no se puede desarrollar una aplicación.

Consiste en utilizar todo el conocimiento y experiencia que pueda aportar el operador y así poder desarrollar el controlador que simule a la persona en su comportamiento.

Ventajas del control difuso:

- No es necesario el modelo matemático del proceso
- Se puede obtener un control no lineal de manera sencilla

Control predictivo por modelo

El MPC es un algoritmo multivariable que necesita de un modelo dinámico del proceso, datos de control anteriores y la función de optimización de costos J , con lo cual calcula los

movimientos de control. Comúnmente el MPC es usado en el desarrollo de proyectos en depósitos de petróleo y gas.

Ventajas del MPC

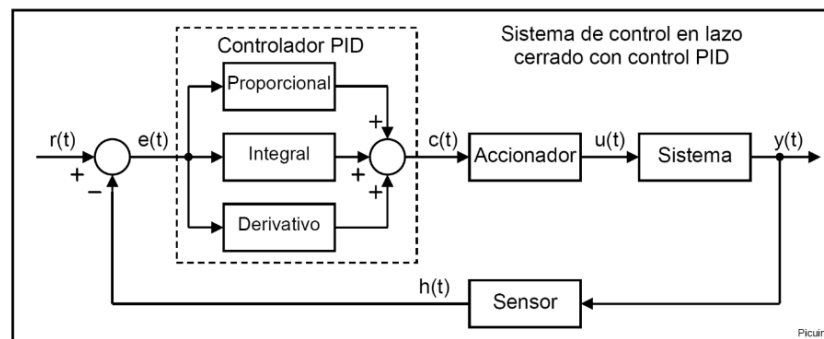
- Gran facilidad de aplicación en diferentes procesos
- Puede obtenerse un regulador lineal en procesos simples
- Se puede incrementar restricciones con facilidad
- Es de gran ayuda cuando se conocen datos futuros

Control PID

Este tipo de control permite tener un control en lazo cerrado para alcanzar el valor de salida esperado, está integrado por su parte proporcional, integral y derivativa.

Figura 2

Controlador PID



Nota. La gráfica representa el esquema de un controlador PID en lazo cerrado, y sus principales componentes. Tomado de (Camarillo, 2021)

El controlador resta la señal de salida de la señal de referencia, obteniendo el error, la misma que suele multiplicarse por valores conocidos como ganancias y luego se aplica esta señal en el sistema, lo cual permite que el control sea lo más cercano al objetivo deseado. (Camarillo, 2021)

Control neuronal

Este control está inspirado en el funcionamiento del cerebro humano, dicho control está formado por nodos o neuronas artificiales conectadas entre sí generando señales desde su entrada hasta obtener una señal de salida, lo que este control busca es el aprendizaje modificándose así mismo, hasta lograr la realización de tareas que no se puede lograr con el control clásico basado en reglas. (ATRIA, 2019)

Entorno virtual

Se define como un sistema informático que genera en tiempo real representaciones de la realidad, que de hecho no son más que ilusiones ya que se trata de una realidad perceptiva sin ningún soporte físico y que únicamente se da en el interior de los ordenadores.

La simulación que hace la realidad virtual se puede referir a escenas virtuales, creando un mundo virtual que sólo existe en el ordenador de lugares u objetos que existen en la realidad (FIB, 2014).

También permite capturar la voluntad implícita del usuario en sus movimientos naturales proyectándolos en el mundo virtual que estamos generando, proyectando en el mundo virtual movimientos reales (Deusens, 2018).

Aplicaciones de los entornos virtuales

Entrenamiento militar

Esta solución VR nació con el objetivo de recrear condiciones de vuelo reales para que los soldados estadounidenses pudieran entrenarse de manera virtual.

Cine

De acuerdo con el panorama cineasta de la década de los años 50, muchos artistas se lanzaron a crear diversos artilugios “futuristas”. En este sentido, el cineasta Morton Heilig lo tuvo claro y tampoco puso barreras creativas para la creación de su próximo dispositivo de Realidad Virtual.

Simulador de vuelo

Thomas Furness fue el encargado de desarrollar un simulador de vuelo, usando la tecnología de Realidad Virtual, llamado Super Cockpit. Este ambicioso proyecto permitía a un piloto controlar un avión utilizando gestos, palabras o movimientos oculares. Además, esta cabina de entrenamiento también proyectaba mapas tridimensionales, imágenes infrarrojas y de radar, y datos de aeronáutica en un espacio tridimensional y en tiempo real.

NASA

La NASA fue una de las primeras instituciones en mostrar al público unas gafas de VR, nada más y nada menos que en la feria electrónica de consumo: CES.

Este dispositivo de Realidad Virtual permitía un campo de visión de 120° en cada ojo, gracias a dos pantallas LCD. Además, incorporaba control por voz y un sistema de reconocimiento de gestos por guantes. En su conjunto, también incluía un traje repleto de sensores para el reconocimiento de movimientos, gestos y orientación espacial del individuo.

Videojuegos

Durante estos años, la Realidad Virtual era un concepto que seguía presente, pero sin nadie que se atreviera a materializarlo en un proyecto interesante. Sin embargo, en 2012, la empresa Palmer Luckey se dio a conocer con un dispositivo que lograba un ángulo de visión de 90°: Oculus Rift. Esto despertó el apetito de Facebook, que en 2014 compró la empresa y comenzó su carrera dentro del mundo de la VR.

Robótica en la industria

El sector de la alimentación, caracterizado por su alto nivel de competitividad, es uno de los sectores que en los últimos años se ha mostrado más abierto a incorporar importantes transformaciones en sus procesos industriales con el fin de conseguir el máximo nivel posible de automatización de estos. En este terreno, la robotización de diversos procesos que integran la cadena productiva de la industria alimentaria ha sido una de las apuestas importantes.

Actualmente, pese a la crisis global, se ha seguido manteniendo un incremento notable de la robotización en el sector de alimentación y bebidas. Según datos de la Asociación Española de Robótica, correspondientes a 2009, la industria alimentaria fue el sector que contabilizó un mayor incremento en cuanto al número de robots instalados, con un aumento del 16'8% respecto a 2008. Hoy en día, ya se ha superado ampliamente la barrera de las 2000 unidades instaladas (Jojot, 2011).

La robótica ha abierto nuevas oportunidades para la automatización de procesos alimentarios. La adopción de dicha tecnología ha sido un proceso lento, pero hoy es ya una realidad incuestionable en muchas industrias del sector y se prevé una demanda creciente en los próximos años. La utilización de robots en el sector alimentario aporta flexibilidad, seguridad y protección de los trabajadores frente a ambientes hostiles y trabajos desagradables. Otras ventajas son una mayor higiene del proceso, repetitividad del tratamiento, efectividad y elevada producción. Al eliminar el contacto humano con los productos en la cadena de producción y envasado, los sistemas robotizados ofrecen la posibilidad de reducir el riesgo de contaminación. (UNIR, 2017)

Tipos de automatización de los robots industriales

Con relación a la industria y necesidades de producción los tipos de robótica industrial son:

- **Fija:** el robot es programado para realizar una tarea de manera consecutiva, esta es utilizada en la producción masiva. (UNIR, 2017)
- **Programable:** el robot es diseñado con la ventaja que puede ser reprogramado y

pueda realizar distintas tareas. (UNIR, 2022)

- **Flexible:** aquí un sistema central controla a los robots y hace que trabajen de manera coordinada. (UNIR, 2017)

- **Integrada:** es la automatización total de las plantas de producción, esto quiere decir que todo es controlado por ordenadores y procesos, siendo la presencia del hombre casi nula, este tipo de automatización es compatible con procesos de producción continuos y por lotes.

(UNIR, 2017)

Aplicaciones y usos de los robots en la industria

En la manufactura la podemos encontrar en la producción de automóviles, la misma que permite incrementar su productividad y calidad, disminuyendo el tiempo de producción.

(InnovaciónDigital360, 2022)

En la medicina se usan robots industriales o sistemas automatizados para actividades que requieren de una gran precisión llegando a realizar cirugías donde un error de precisión puede ser fatal. (InnovaciónDigital360, 2022)

También se la puede ver en varios campos como en la agricultura, la seguridad, la producción de alimentos, militar, entre otras, siendo utilizada cada vez para más aplicaciones.

HMI

Un sistema HMI es una interfaz de usuario o panel de control que conecta a una persona con una máquina, sistema o dispositivo. Aunque el término puede aplicarse técnicamente a cualquier pantalla que permita al usuario interactuar con un dispositivo, la HMI se utiliza más comúnmente en el contexto de los procesos industriales que controlan y monitorean máquinas de producción (Rosas, 2018)

El HMI es la interfaz entre el proceso y los operadores, una línea de producción, siendo una herramienta clave para que los trabajadores y supervisores puedan controlar los diferentes

procesos.

Su función principal es proporcionar de información del proceso, permitir controlar y optimizar los procesos.

Ventajas del uso de HMI

- **Mayor visibilidad:** al tener un HMI de alto rendimiento se suele tener mejor visibilidad de todas las tareas en cualquier instante de tiempo, esto muestra el rendimiento de equipos de manera sencilla, pudiendo acceder inclusive de manera remota. (COPADATA, 2017)
- **Mejor eficiencia:** se puede usar con el fin de controlar la producción e incluso reajustar en caso de ser necesario. (SDINDUSTRIAL, 2019)
- **Disminución de periodos inactivos:** al tener alertas se puede dar solución con más rapidez a los problemas, disminuyendo el tiempo de paro de actividades. Estudiar los datos de rendimiento de los diferentes equipos puede prevenir problemas. (SDINDUSTRIAL, 2019)
- **Usabilidad mejorada:** el uso de los HMI facilita el entendimiento de los datos a los usuarios, pudiendo presentar los datos incluso en gráficas de fácil comprensión (SDINDUSTRIAL, 2019)

Tipos de HMI

HMI de alto rendimiento

Este tipo de HMI son sencillos y libres de controles y gráficos, mientras que el diseño, color, tamaño y ubicación, suelen ser discretos mejorando la experiencia del usuario.

Monitoreo remoto

Da más flexibilidad y fácil acceso para los operadores, con esta función se puede controlar y supervisar los procesos desde un ordenador, el mismo que puede encontrarse fuera de la planta. (SDINDUSTRIAL, 2019)

HMI de red y de cloud

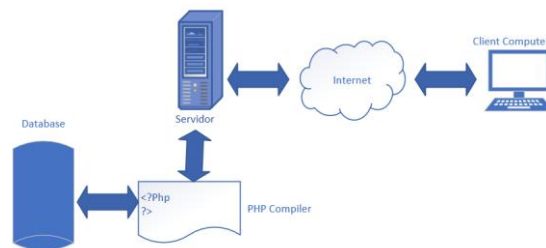
Permiten acceder a datos mediante dispositivos de campo, incluso subir datos desde el HMI a la nube, pudiendo analizarlos de manera remota.

Internet de las cosas

El IoT consiste en maquinaria y dispositivos electrónicos conectados a Internet y enlazadas a plataformas de análisis que procesan los datos que se generan. Los dispositivos IoT van desde pequeños sensores hasta complejos robots industriales. La palabra «industrial» puede referirse a almacenes, astilleros, etc, en las tecnologías el IoT es muy prometedora para una amplia gama de sectores industriales, como la agricultura, la sanidad, los servicios financieros, el comercio minorista y la publicidad.

Figura 3

Conexión WebServer



Nota. La gráfica representa la manera en la cual va a estar realizada la comunicación dentro del Servidor Web, empezando en la Base de datos obtenida hasta llegar al usuario.

Por lo mencionado, se realiza el desarrollo de un servidor en HTML, el cual se pueda acceder desde cualquier dispositivo con acceso a internet o red local. Este servidor se implementa en el mismo controlador (Arduino), para una mejor autonomía (Royappa, 2000)

Podemos ver diferentes usos de IoT como:

- Fabricación inteligente
- Mantenimiento predictivo y preventivo
- Redes eléctricas inteligentes

Día a día diferentes tipos de máquinas tiene la capacidad de conectarse a internet, con lo cual el IoT va en crecimiento, con lo cual el IoT ayuda a reunir datos de manera automática, las máquinas IoT pueden enviar los datos reunidos a un sistema principal.

Ventajas del IoT

- **Eficiencia mejorada:** los equipos del IoT reúnen los datos de procesos y recursos que se están utilizando, con lo cual se puede gestionar de mejor manera los procesos, logrando encontrar maneras de mejorar la productividad. (COPADATA, 2017)

- **Periodos de inactividad reducida:** con el uso de alarmas se puede avisar de problemas a los operarios con lo que se permite realizar mantenimientos predictivos, ayudando a reducir las pérdidas de ingresos, incluso evitar futuros problemas en los diferentes equipos. (COPADATA, 2017)

- **Control remoto:** una vez que se tiene las máquinas conectadas a IoT, se puede lograr su control en cualquier lugar con conexión de Internet.

- **Mayor seguridad:** teniendo todo conectado a IoT, se puede tener mayor protección ya que se tiene control absoluto evitando así las posibles pérdidas de datos. (COPADATA, 2017)

- **Toma de decisiones:** los sensores permiten recopilar datos en mayor volumen, con lo cual se puede tomar decisiones con más seguridad, ayudando a predecir resultados.

Cinemática del robot

La cinemática del robot se encarga del estudio de los movimientos y posiciones de las

diferentes partes del robot, es decir la cinemática se enfoca en como se mueve el robot, sin tener en cuenta las causas del movimiento. Para estudiar la cinemática de un robot, es necesario tener un modelo matemático del robot, el cual deberá describir sus movimientos. (Barrientos, 1997)

Principalmente se tiene dos problemas fundamentales:

Problema cinemático directo

Teniendo conocidos los valores de las articulaciones y parámetros geométricos de cada elemento del robot, se busca determinar la posición y orientación del extremo final del robot respecto a un sistema de coordenadas de referencia. (Barrientos, 1997)

Problema cinemático inverso

Teniendo conocida la orientación y posición del extremo del robot busca la configuración que debe tomar el robot.

Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemático directo

Se usa una matriz de transformación homogénea para describir la relación entre dos elementos rígidos adyacentes, con lo cual se reduce el problema cinemático directo a una matriz de transformación homogénea 4x4, el cual relaciona la ubicación del extremo del robot en el espacio respecto a un sistema de coordenadas de la base del robot. (Barrientos, 1997)

Pasos para la obtención del modelo cinemático directo

D-H 1: enumerar todos los eslabones, la base fija del robot será el eslabón 0.

D-H 2: enumerar las articulaciones, las mismas que corresponden al grado de libertad, por lo cual se puede tener n articulaciones.

D-H 3: identificar el eje en cada articulación, en caso de ser prismática el eje estará a lo largo de donde se produce el desplazamiento.

D-H 4: para i de 0 a n-1 situar el eje z_i sobre el eje de la articulación i+1.

D-H 5: colocar el sistema de la base (S_0) en un punto del eje Z_0 , los ejes x_0 y y_0 se ubican formando un dextrógiro con z_0 .

D-H 6: para i de 1 a $n-1$, colocar S_i en dirección del eje Z_i con la línea común a Z_{i-1} y Z_i , en caso de que los ejes se corten se sitúa en el punto de corte, y si son paralelos en la articulación $i+1$.

D-H 7: ubicar X_i en la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i .

D-H 8: ubicar Y_i tal que forme un dextrógiro con X_i y Z_i .

D-H 9: ubicar S_n en el extremo del robot, tal que Z_0 coincida con la dirección de Z_{n-1} y X_n sea normal a Z_{n-1} y Z_n .

D-H 10: Obtener θ_i como el ángulo que debe girar en torno a Z_{i-1} para que X_{i-1} y X_i sean paralelos.

D-H 11: obtener d_i que es la distancia a lo largo de Z_{i-1} que debería desplazar S_{i-1} para que X_i y X_{i-1} estén alineados.

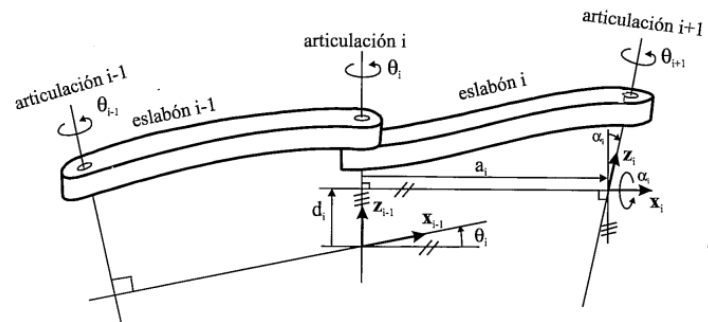
D-H 12: encontrar a_i , que es la distancia en X_i que se debe desplazar S_{i-1} para que su origen coincida con S_i .

D-H 13: se encuentra α_i , que es el ángulo que se debe girar entorno a X_i para que S_{i-1} coincida con S_i .

D-H 14: Obtener la matriz de transformación. (Barrientos, 1997)

Figura 4

Parámetros D-H para un eslabón giratorio.



Nota. La figura representa los parámetros D-H entre dos eslabones con sus respectivas articulaciones. Tomado de (Barrientos, 1997)

Capítulo III

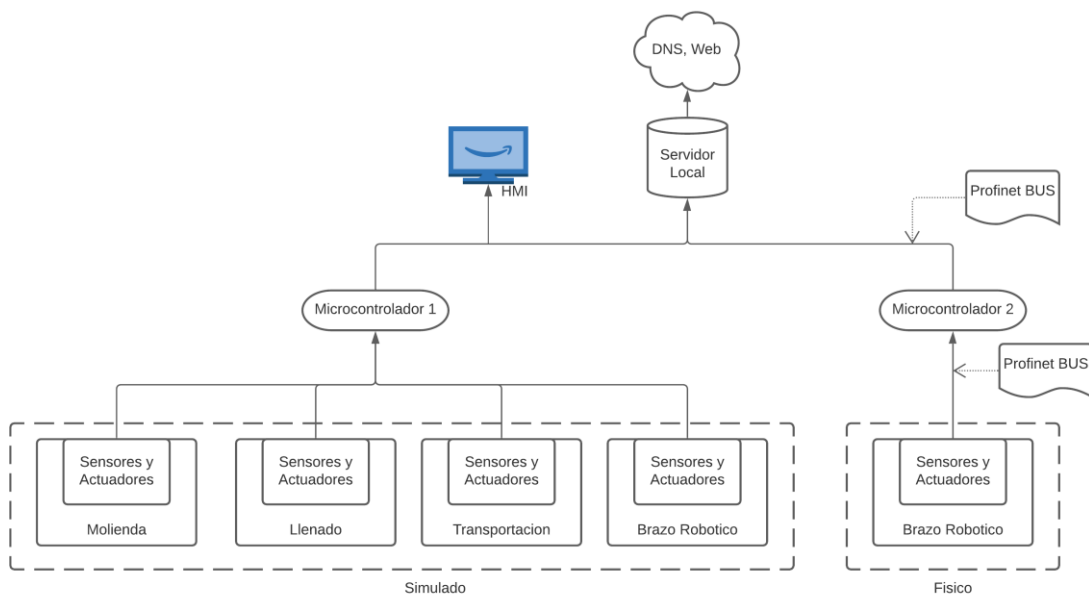
Diseño del sistema de control automático

En este apartado se describirá cada una de las etapas por las cuales está formado el proceso de producción de harina de trigo, se obtendrá los modelos matemáticos para los componentes del sistema como lo es brazo robótico de 6 grados de libertad, posteriormente se realizará la automatización para cada uno de los procesos y subprocesos que se encuentra en la planta para la producción de harina, el diseño del controlador con el cual trabajará el brazo robótico, la configuración del controlador PID para el proceso de la molienda, una vez realizado lo mencionado antes, se procederá a la realización del entorno virtual 3D, el mismo que contendrá todos los procesos y subprocesos necesarios, posteriormente se seleccionará el brazo robótico con el cual se trabajará en la parte física, se determinará los elementos eléctricos necesarios para la parte física como lo es el brazo robótico y la banda transportadora, luego se realizará la comunicación entre la parte virtual y física del proyecto, por último se diseñará el HMI correspondiente para la planta, y se realizará las pruebas de funcionamiento de toda la planta.

La comunicación un apartado importante para la conexión entre el controlador y el proceso industrial, para lo cual se propone el uso de comunicación ethernet industrial entre el software (Unity 3D) y los controladores del proceso, a fin de simular los sensores y actuadores de todo el proceso en tiempo real.

Figura 5

Diagrama de comunicación entorno virtual - físico



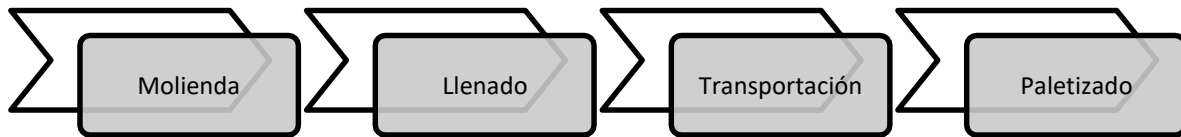
Nota. La imagen muestra como se va a estar unida el entorno virtual con la parte física.

Identificación de secuencias de funcionamiento del proceso

El proyecto de investigación de un sistema de control automático para la producción de harina de trigo, orientado a la industria 4.0 y mediante la técnica Hardware In The Loop, consta de 4 etapas principales, las cuales se describen a continuación:

Figura 6

Secuencias de funcionamiento del proceso



Nota. El grafico representa la secuencia de los procesos por los que debe pasar el trigo, para la obtención de harina de trigo y su paletizado.

Primera Etapa (Molienda).

Es un subproceso secuencial que consta de salidas y entradas digitales (sensores y actuadores), las cuales se descomponen en otros subprocesos que constan de trituración, separación y purificación.

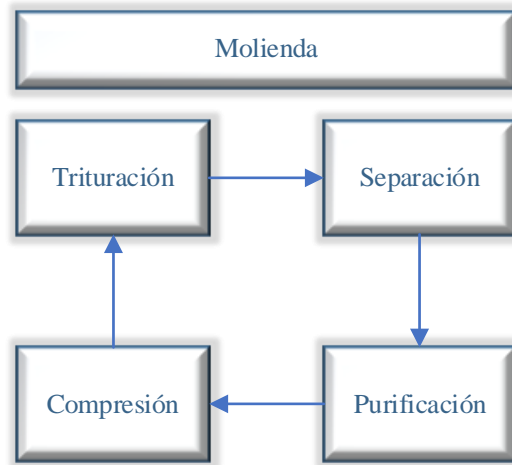
En la etapa de molienda, el producto solido es triturado reduciéndolo a una estructura muy delgada que va entre 150um y 450um. Debido a que la estructura del grano tiene una recubierta denominada envoltura, se produce un efecto de basura después de la trituración por lo cual son necesarias las etapas de separación y purificación, en las cuales se procede a la limpieza de los elementos superiores a 450um.

Esto generalmente se lo realiza a base de inyección de aire moderado en la superficie plana, con la finalidad que se asienten las moléculas pesadas y se levanten las moléculas livianas, logrando limpiar dichas impurezas continuando con la compresión.

La compresión es el proceso de agitar la harina con el fin de retener únicamente las partículas de harina.

Figura 7

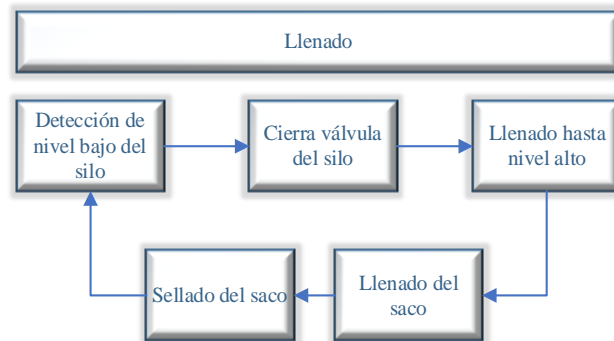
Secuencia de la molienda



Nota. La gráfica muestra los subprocesos que se deben llevar a cabo dentro del proceso de la molienda del trigo, para pasar al siguiente proceso.

Segunda Etapa (llenado de sacos).

En esta etapa se controla el llenado de los sacos por peso en Kg, la misma que será controlada por un algoritmo (implementado en el PLC). En esta etapa se considera a cada saco como un producto independiente, para simular el comportamiento del llenado, al ser un proceso secuencial esta etapa se verá afectada directamente por los resultados obtenidos de la primera etapa. Se considera generar un modelo matemático dinámico, a fin de usarlo para el diseño de un controlador estándar.

Figura 8*Secuencia del llenado*

Nota. La imagen muestra al proceso de llenado, el mismo que tiene diferentes sub procesos dentro, para poder realizar el llenado del saco y su sellado.

Tercera Etapa (Transporte de sacos).

En esta etapa se transporta los sacos y distribuye a las áreas requeridas, se realizará la simulación (Mediante modelos matemáticos) de los variadores de velocidad, sensores y actuadores que forman parte de la banda transportadora no lineal.

Figura 9*Secuencia de transporte*

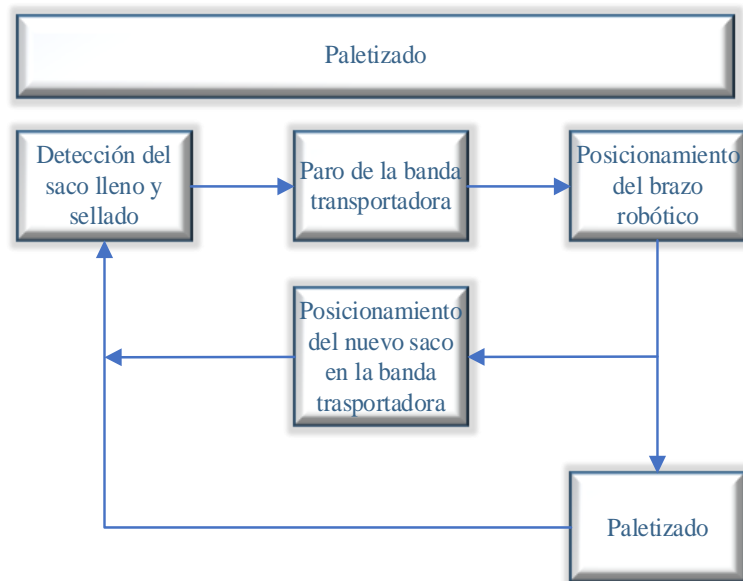
Nota. El gráfico representa el subproceso que va a estar dentro del proceso del transporte, es decir la activación de las bandas transportadoras.

Cuarta Etapa (Paletizado y distribución).

En esta etapa se encuentra el brazo robótico, que es el encargado de paletizar, su simulación requiere la representación del comportamiento cinemático y dinámico, para lo cual se propone el diseño del modelo no lineal MIMO del brazo robótico de 6 grados de libertad, que será controlado mediante un algoritmo de control avanzado no lineal discreto. En esta etapa se considera la implementación de un brazo robótico de bajo costo a ser controlado mediante una tarjeta embebida, que permitirá emular el funcionamiento en un proceso industrial real.

Figura 10

Secuencia de paletizado



Nota. En la gráfica se puede observar que dentro del proceso de paletizado existen diferentes subprocesos, e incluso un ciclo para poder realizar el paletizado.

Obtención de los modelos matemáticos de los componentes del sistema

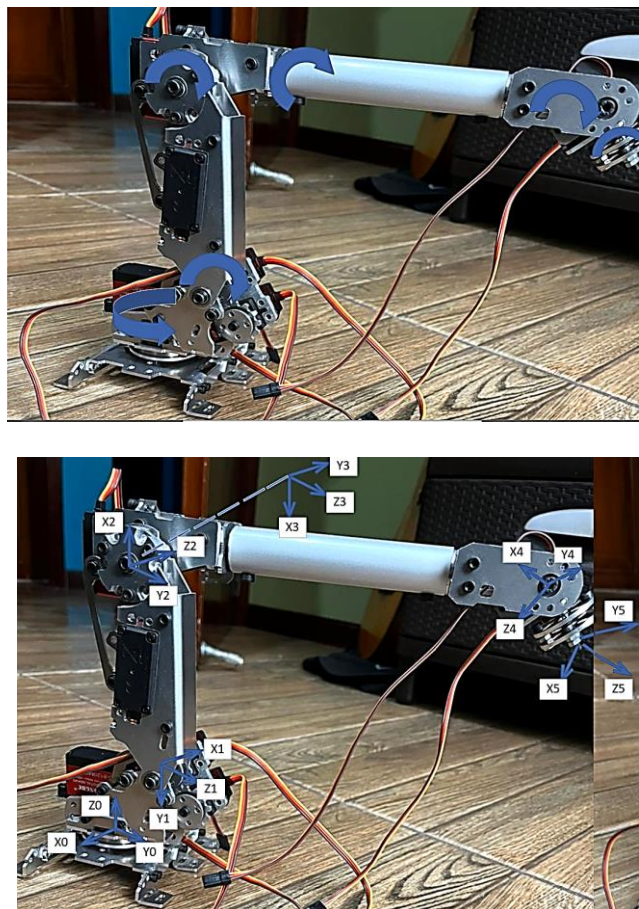
En este apartado se mostrará los modelos matemáticos que serán utilizados para cada uno de los componentes que intervienen en el sistema.

Obtención del modelo matemático del brazo robótico de 6GDL

A continuación se presenta la obtención del modelo matemático del brazo robótico mediante el desarrollo de los parámetros D-H teniendo en cuenta el modelo cinemático directo.

Figura 11

Parámetros y características para modelo DH.



Nota. En la figura podemos observar las características de los parámetros D-H ubicados en cada una de las articulaciones del brazo robótico de 6GDL.

Con el modelo cinemático directo lo que se busca encontrar es la matriz de transformación, la misma que relaciona el sistema de coordenadas del cuerpo en movimiento y el sistema de coordenadas de referencia. Esto se logra utilizando matrices de transformación homogénea 4x4 con operaciones como rotación y traslación.

Estructura de una matriz de transformación homogénea.

$$T = \begin{bmatrix} \text{matriz de rotación} & \text{vector de posición} \\ \mathbf{f}_{1 \times 3} & \text{escalado} \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

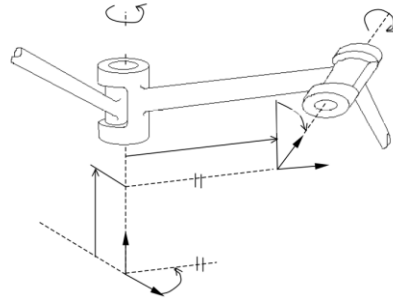
Los vectores que se puede observar: n, s, a, cada uno de ellos son vectores ortogonales, mientras que el vector p nos da la posición en los ejes x, y, z entorno al sistema en el que se encuentra con respecto al sistema de referencia.

Matriz de transformación homogénea:

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 10 \\ 0 & -1 & 0 & 4 \\ -1 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Figura 12

Movimiento de eslabones del brazo robótico de 6GDL



Nota. En la figura se puede observar como se realiza el movimiento de los eslabones en cada articulación y sus respectivos sistemas de coordenadas. Tomado de (Hernández, 2012).

En base a las reglas de los parámetros D-H, se obtiene la matriz de transformación a continuación:

$$T = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Tabla 1*Parámetros D-H para el brazo robótico de 6GDL*

Eslabón	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$\theta_1 + \pi / 2$	l_1	0	$-\pi / 2$
2	$\theta_2 + \pi / 2$	0	a_2	0
3	$\theta_3 + \pi$	0	0	$\pi / 2$
4	θ_4	l_4	0	$-\pi / 2$
5	θ_5	0	0	$\pi / 2$
6	θ_6	l_6	0	0

Nota. Esta tabla muestra los valores obtenidos en los parámetros D-H. Tomado de (Universidad Miguel Hernández, 2000)

Automatización de los procesos y subprocesos para la obtención de harina

Procesos y subprocesos a realizar para la obtención de harina.

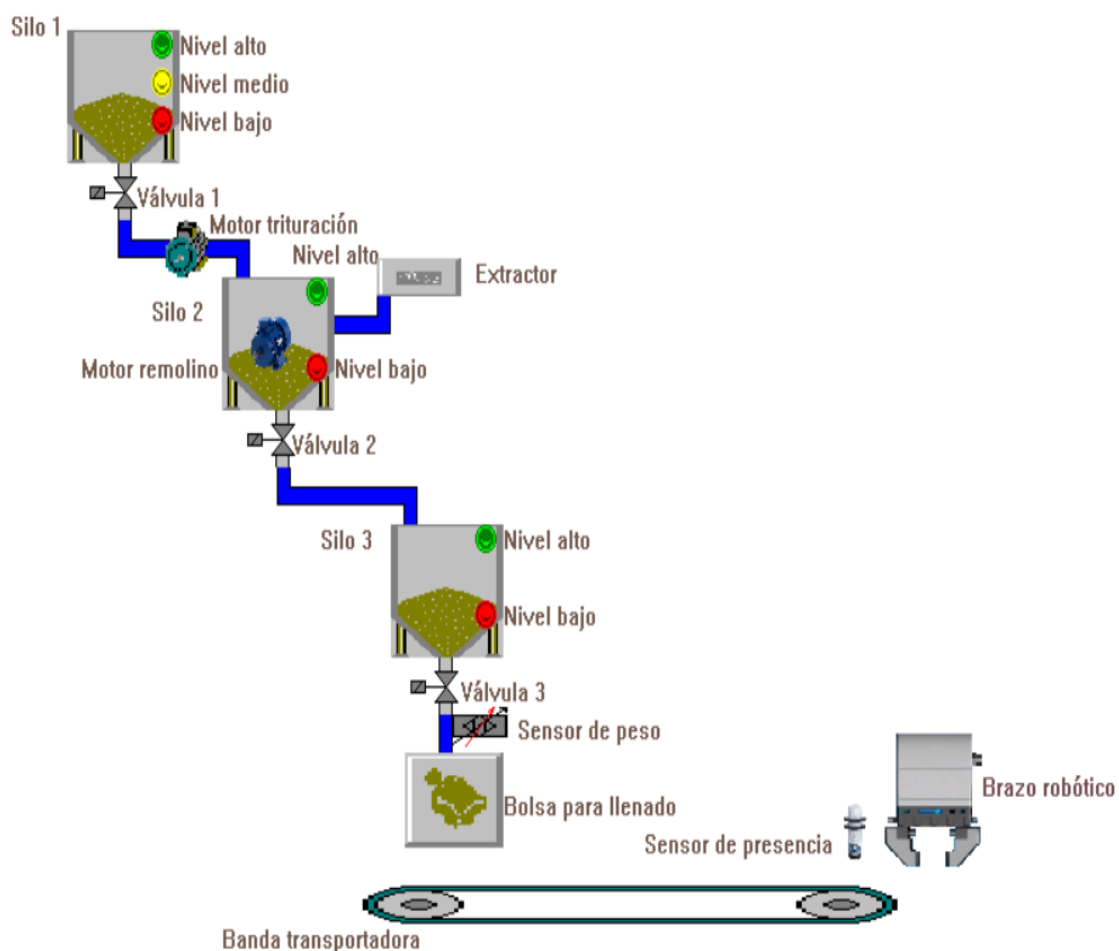
Se tendrá un silo, en el cual estará almacenado el trigo previamente recolectado, el mismo que consta de tres sensores de nivel: alto, medio y bajo respectivamente, en la parte inferior del silo se encuentra una válvula, la misma que se abre y deja que el trigo pase a través de una tubería para su trituración, el producto una vez triturado pasa a un segundo silo, siempre y cuando el segundo silo se encuentre en un nivel bajo, en este segundo silo encontramos dos sensores de nivel: alto y bajo, dentro de este se encuentra un motor encargado de remoler el material triturado, y un extractor para eliminar las impurezas, obteniendo así el material comprimido, una vez terminado este proceso y mientras el nivel alto del silo este encendido, y el nivel de bajo del tercer silo este encendido se abre la válvula de salida del segundo silo, y permite que el material pase al siguiente al tercer silo, el tercer silo constará de

sensores de nivel alto, bajo, en su parte inferior tendrá una válvula de salida la cual deja caer la harina para el llenado de los sacos, el saco se llena hasta que se llega a un determinado peso y se detiene, una vez que el saco se encuentra lleno se lo sella y pasa a la etapa de paletizado.

En la siguiente imagen se puede observar una representación gráfica de como será la planta para la producción de harina.

Figura 13

Esquema del proceso de obtención de harina



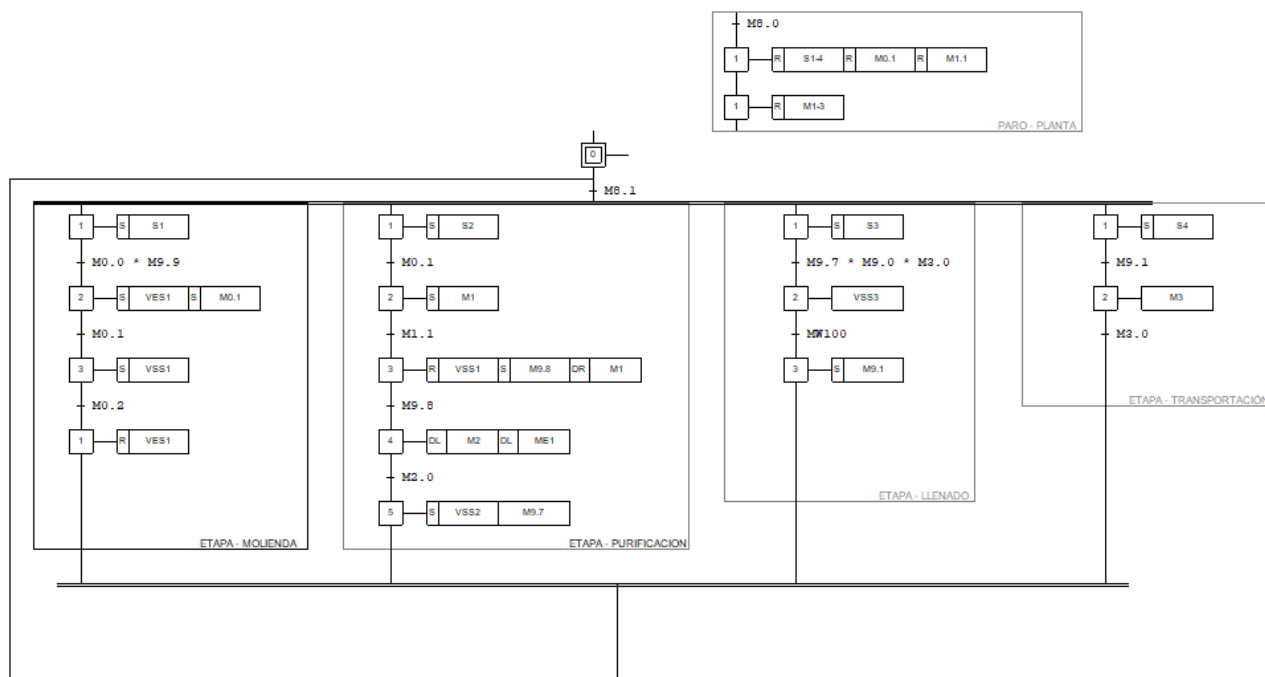
Nota. La figura representa el esquema de toda la planta, con sus respectivos procesos y subprocesos.

Programación del PLC para la automatización de las etapas del proceso de producción de harina.

En este punto se realizará la programación necesaria para cada una de las etapas dentro del procesos de producción de harina, para lo cual se ha hecho uso del software TIA Portal para su realización, para poder efectuar toda la programación se ha basado en el diagrama Grafcet, el mismo que cuenta con todas las etapas con las que se va a trabajar.

Figura 14

Diagrama Grafcet para el proceso de producción de harina.



Nota. la imagen muestra el diagrama Grafcet para la producción de harina.

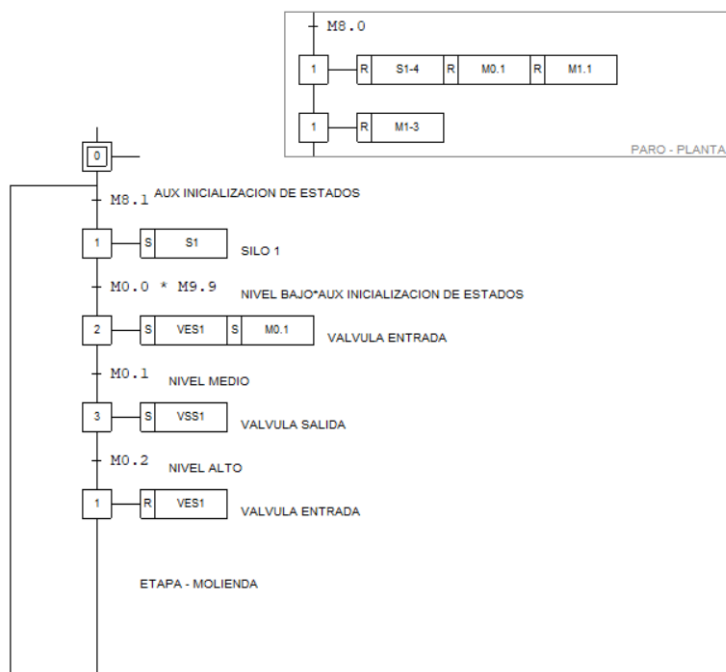
Molienda

En esta etapa se realizará la configuración del bloque para la comunicación con el entorno virtual Unity. Posterior a esto se realiza el diseño del código para el funcionamiento del proceso de la

molienda, se tendrá un botón de inicio en la planta, la cual dará inicio al proceso, el molino antes de encenderse, detecta si se encuentra vacío o no, en caso de que se encuentre vacío, entonces se abrirá la válvula de salida del silo 1 en el cual está almacenada toda la materia prima, una vez abierta está válvula el material pasa al proceso de la molienda y cierra la válvula, al detectar que ya se encuentra material en el molino, este se enciende y empieza a realizar su trabajo por un determinado tiempo, transcurrido el tiempo, el material molido pasa a la siguiente etapa.

Figura 15

Control Molienda



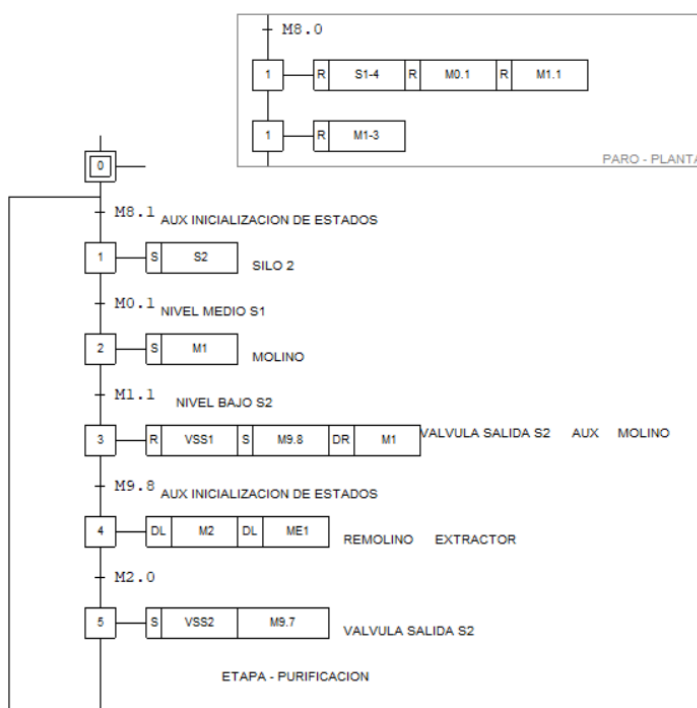
Nota. La figura muestra la programación realizada para lograr el control del proceso de molienda y sus sub procesos.

Extracción de impurezas

La extracción de impurezas es un subproceso, en el cual una vez que se realizó la molienda y el material pasa al siguiente silo, se activa un motor encargado de remoler, con la finalidad de separar las impurezas presentes en la harina, tal como granos de metales, partículas de tierra, etc.

Figura 16

Grafcet extracción de impurezas.



Nota. En la imagen se poder ver el diagrama Grafcet para la extracción de impurezas luego de la molienda.

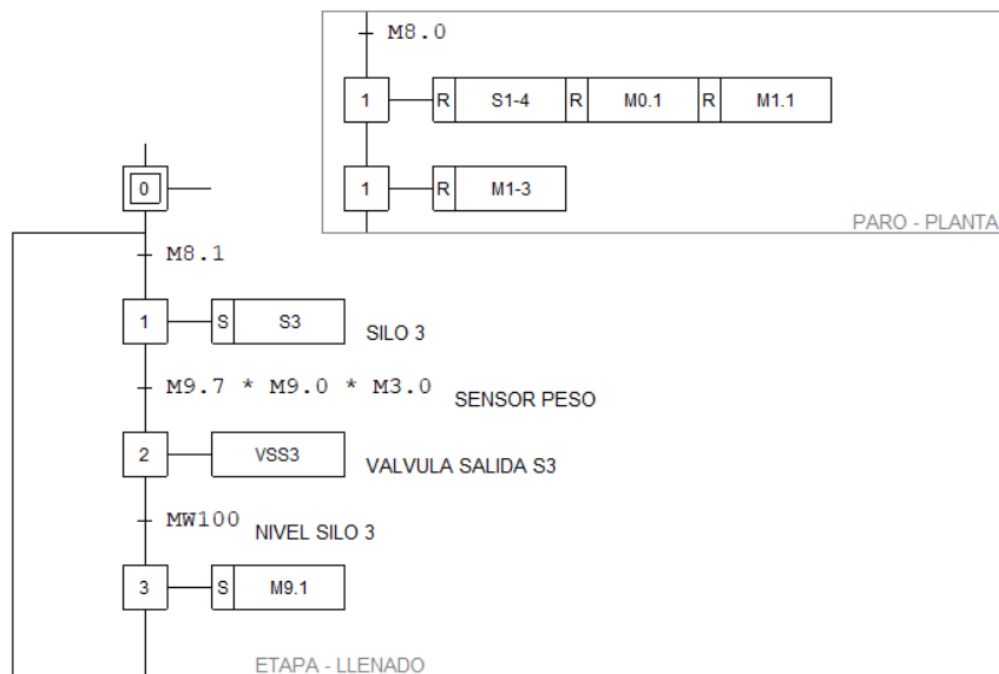
Llenado de sacos

Para el control del llenado de sacos, se trabajará con un sensor de peso, la harina obtenida se encuentra almacenada en el silo 3, el cual tiene una válvula de salida, la misma que permitirá realizar el llenado de los sacos, para iniciar este proceso el sensor de peso detectará el peso del saco mientras este

se está llenando, una vez que el peso del saco ha llegado a su valor ideal, la válvula de salida se cierra por completo y se sella el saco. Este proceso es repetitivo mientras se tenga harina dentro del silo 3.

Figura 17

Control llenado de sacos



Nota. La figura muestra el algoritmo diseñado para el control para el llenado de los sacos.

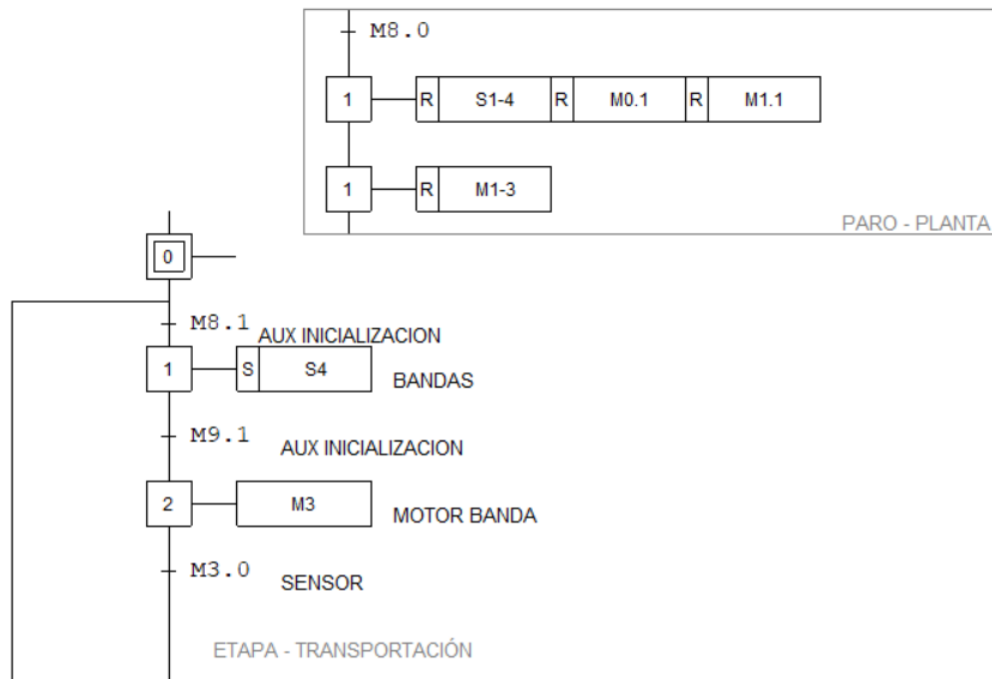
Bandas transportadoras

Las bandas transportadoras empiezan a funcionar una vez que se ha iniciado los procesos en la planta, estas bandas funcionan siempre y cuando el brazo robótico para el proceso de paletizado no este en funcionamiento, ya que mientras el robot realice el paletizado de los sacos la banda debe detenerse por un instante de tiempo mientras el robot toma el saco y lo lleva hacia el pallet, dentro de las bandas transportadoras habrá sensores, los mismos que envían sus señales hacia el controlador y las compara,

en caso de que el sensor colocado en la ubicación del brazo robótico detecte la presencia de un saco, la banda se detendrá por un instante y volverá a funcionar nuevamente, esto se realizará de manera repetida mientras haya sacos en la banda.

Figura 18

Control llenado de bandas transportadoras



Nota. La figura muestra el algoritmo diseñado para el control de las bandas transportadoras que llevan los sacos llenos..

Paletizado

El proceso de paletizado mediante el brazo robótico, empieza una vez que el sensor colocado en la ubicación del robot detecta la presencia de un saco, este sensor envía una señal al robot, el cual hace que el robot empiece a realizar el paletizado, a la vez que por un determinado tiempo la banda se

detendrá por un tiempo específico, el robot se encontrará en una posición inicial, al empezar el proceso el robot se mueve, se coloca sobre la banda transportadora y toma el saco, cuando el saco es tomado la banda vuelve a funcionar hasta que se detecte otro saco en la ubicación del robot.

Diseño de controladores

Se presentará cada uno de los controladores realizados, tal como el controlador perteneciente al brazo robótico de 6GDL, como el controlador PID realizado para el control del motor dentro de la etapa de la molienda.

Diseño del control para el brazo robótico mimo de 6GDL

Una vez que se logró obtener la matriz con los parámetros Denavit Hartenberg mediante el método analítico, se procede a reemplazar cada una de las variables y obtener la matriz real. Mediante el uso de la herramienta MatLab se reemplaza cada una de las variables se logra obtener la matriz de los parámetros Denavit Hartenberg.

Se define cada uno de los eslabones para el brazo robótico.

Figura 19

Definición de eslabones en MatLab

```
>> L1=Link([0 80 37 -pi/2 0]);
L2=Link([-pi/2 -35 130 0 0]);
L3=Link([0 25 15 -pi/2 0]);
L4=Link([0 186 0 pi/2 0]);
L5=Link([0 0 0 -pi/2 0]);
L6=Link([0 25 0 0 0 0]);
```

Nota. La imagen muestra la definición de los eslabones para el brazo robótico.

Obteniendo los valores para cada uno de los eslabones correspondientes.

Figura 20

Valores obtenidos para cada uno de los eslabones

```

L1 =
Revolute(std): theta=q, d=80, a=37, alpha=-1.5708, offset=0

L2 =
Revolute(std): theta=q, d=-35, a=130, alpha=0, offset=0

L3 =
Revolute(std): theta=q, d=25, a=15, alpha=-1.5708, offset=0

L4 =
Revolute(std): theta=q, d=186, a=0, alpha=1.5708, offset=0

L5 =
Revolute(std): theta=q, d=0, a=0, alpha=-1.5708, offset=0

L6 =
Revolute(std): theta=q, d=25, a=0, alpha=0, offset=0

```

Nota. La imagen muestra los valores obtenidos de cada parámetro de los diferentes eslabones del brazo robótico.

De esta manera podemos obtener la matriz real de los parámetros Denavit Hartenberg de la siguiente manera.

Figura 21

Matriz real de parámetro Denavit Hartenberg

j	theta	d	a	alpha	offset
1	q1	80	37	-1.5708	0
2	q2	-35	130	0	0
3	q3	25	15	-1.5708	0
4	q4	186	0	1.5708	0
5	q5	0	0	-1.5708	0
6	q6	25	0	0	0

Nota. La imagen muestra la matriz con los parámetros D-H obtenidos mediante el software MatLab.

Evaluación del comportamiento de los errores de control para el brazo robótico

Una vez realizado el diseño del algoritmo de control para el brazo robótico de 6gdl, se ha realizado la simulación por el movimiento del robot.

Primero se ingresa el valor de los ángulos que se desea mover el brazo robótico.

Figura 22

Valores del vector ingresado

```
qz = [pi/2,0,0,0,0,0]
qz = 1x6
    1.5708    0    0    0    0    0
```

Nota. La imagen muestra el ángulo que se desea que el brazo robótico se mueva.

Una vez ingresado el vector para el movimiento, se obtiene la matriz T con la posición en la cual se va a encontrar el robot una vez que se haya movido.

Figura 23

Valores del vector ingresado

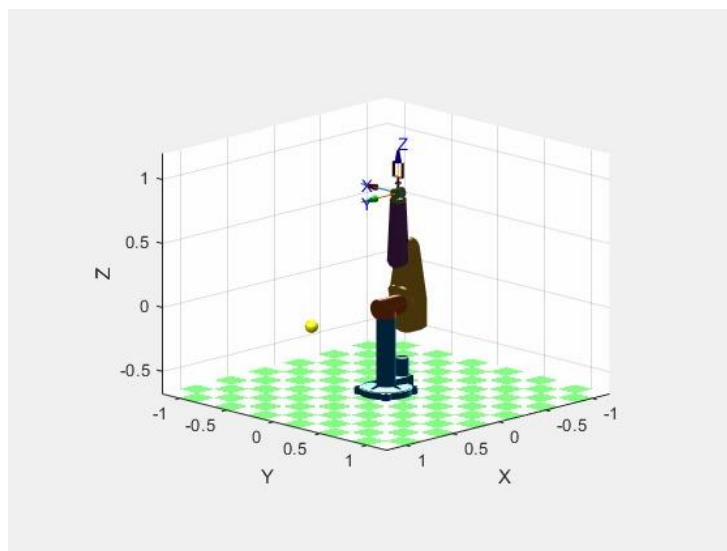
```
T =
    0    -1    0    0.1501
    1     0    0    0.4521
    0     0    1    0.4318
    0     0    0     1
```

Nota. La imagen muestra la posición final en la cual se va a encontrar el brazo robótico. Elaborado por los Autores.

Ahora podemos observar como se encuentra el robot en su posición inicial antes de realizar el movimiento.

Figura 24

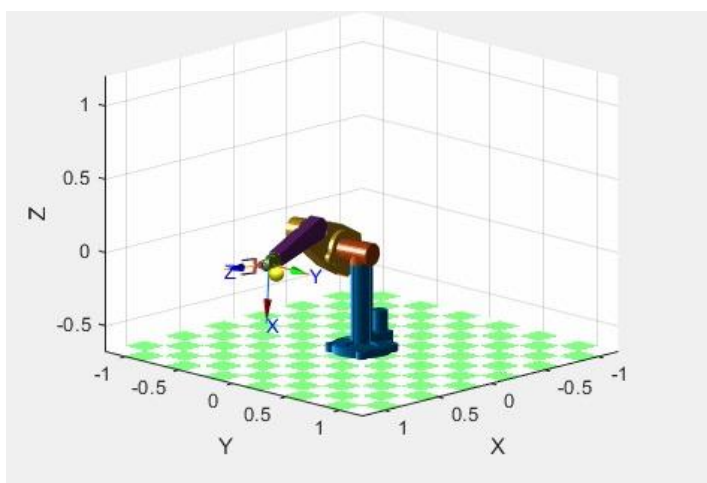
Posición inicial brazo robótico



Nota. La imagen se observa el brazo robótico antes de realizar su movimiento.

Figura 25

Posición final brazo robótico



Nota. La imagen muestra el brazo robótico ubicado en la posición final.

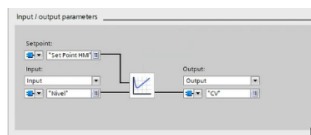
Controlador PID para la etapa de Molienda.

Para el control realizado en esta etapa, se ha utilizado el bloque PID, sin embargo solo se ha implementado un controlador PD, por lo cual no se ha hecho uso de la constante integral para el control del molino encargado de la trituración del material.

Realizamos todas las configuraciones para realizar un auto tuning y obtener sus respectivos parámetros.

Figura 26

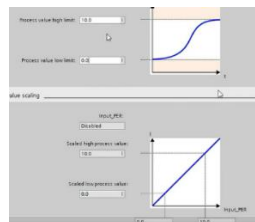
Configuración del Bloque PID. Entradas y Salidas de las variables



Nota. La figura muestra la configuración del PID para el motor en la molienda.

Figura 27

Configuración parámetros del PD



Nota. La figura muestra la configuración del PD para el motor en la molienda.

Diseño entorno virtual mediante el software Unity 3D.

Para el diseño del entorno virtual, se tomó en cuenta todo lo que debe existir en este entorno, con la finalidad de poder representar con mayor exactitud todos los elementos que pueden existir en

una planta real, aquí se ha procedido a la creación de cada uno de los silos que van a estar dentro de los diferentes procesos, así como sensores, bandas transportadoras, el brazo robótico de 6GDL, la estación de paletizado ubicado al final de la planta, al igual que todos los elementos necesarios para su simulación.

En la imagen a continuación se presenta una vista general del como se encuentra el entorno virtual, en la cual podemos observar en el exterior los silos en los cuales se irá almacenando el material de acuerdo a la etapa en la que se encuentre.

Figura 28

Exterior del entorno virtual



Nota. La imagen muestra como se verá la arte exterior de la planta de producción de harina.

Figura 29

Exterior del entorno virtual

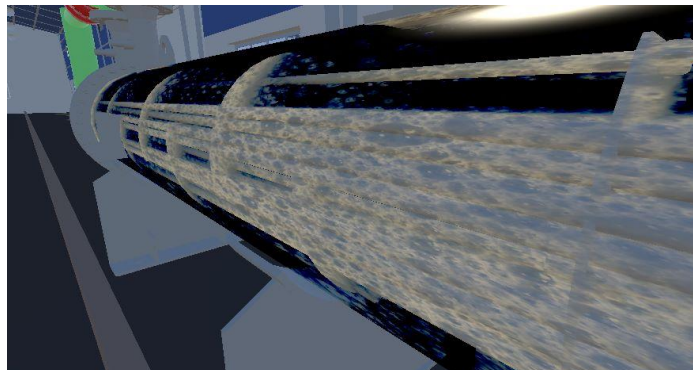


Nota. En la imagen se puede observar la vista lateral del área exterior de la planta diseñada.

Ahora se presenta una vista preliminar de como se verá el interior del proceso de molienda, en específico el momento en el cual se trituran los granos dentro del molino.

Figura 30

Creación del entorno virtual

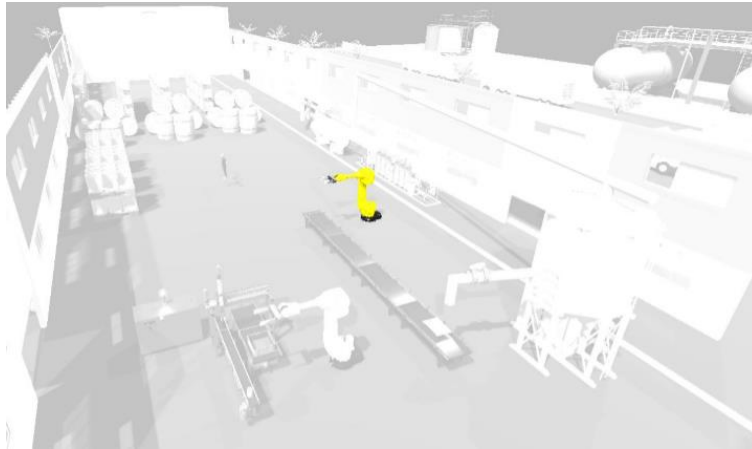


Nota. La imagen muestra la etapa de filtrado.

En la siguiente imagen podemos ver como se encontrará el entorno virtual para la etapa de las bandas transportadoras que llevarán los sacos una vez que hayan sido llenados y sellados.

Figura 31

Entorno para bandas transportadoras



Nota. La imagen muestra la vista lateral de como se va a ver la planta en el entorno virtual realizado.

Figura 32

Área de almacenamiento.



Nota. En la imagen se puede apreciar el área de almacenamiento, la cual será utilizada posteriormente al proceso de paletizado.

Diseño del entorno virtual para el proceso de paletizado

Teniendo en cuenta las medidas mencionadas anteriormente se realiza el dimensionamiento de la celda, la cual consta de los siguientes componentes esenciales:

- Brazo robótico
- Banda transportadora
- Controlador
- Componentes I/O para el control de la planta
- Fuente de poder para el brazo robótico

Figura 33

Diseño del entorno virtual para la etapa de paletizado

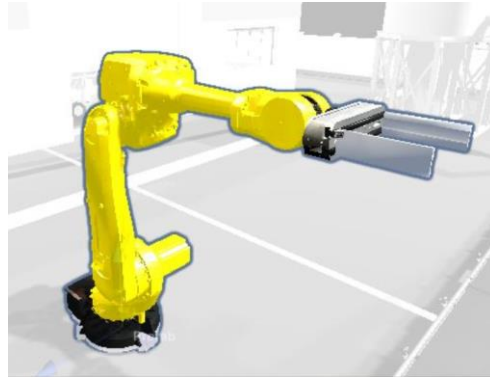


Nota. La imagen muestra el área de paletizado, donde se encuentra la banda con los sacos y el robot para realizar la tarea.

En la siguiente imagen se puede observar como el brazo robótico estará ubicado a un lado de la banda transportadora, el mismo que estará a la espera de que los costales con harina lleguen hasta su posición para poder realizar la tarea de paletizado.

Figura 34

Banda transportadora y robot



Nota. La imagen muestra a la banda transportadora final y el brazo para el paletizado. Mientras la banda está activa, los sacos van sobre ella hasta llegar a la posición en la cual se encuentra el robot, y se detiene.

A continuación, podemos observar la sección en donde encontraremos los componentes tanto de entrada como de salida, al igual que la alimentación necesaria para todo el funcionamiento, en donde a la vez se podrá encontrar a un operador, mismo que estará encargado.

Figura 35

Componentes I/O y alimentación

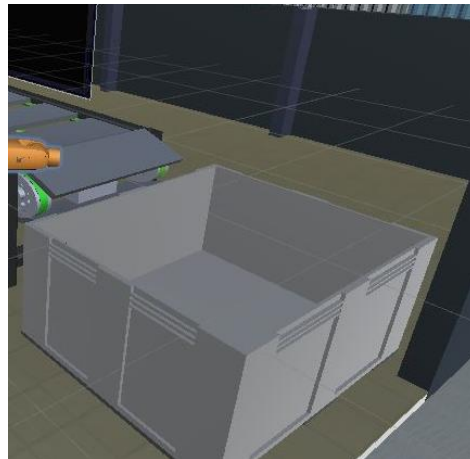


Nota. La imagen muestra el área en la cual va a estar los componentes I/O y la alimentación, tanto para la banda transportadora, como para el robot, sensores y actuadores en esta etapa.

Una vez que los costales sobre la banda lleguen hasta la posición en la cual se encuentra el brazo robótico, la banda se detendrá por un momento, lo cual permitirá que el robot tome el costal y lo coloque en el pallet que se encontrará ubicado a un lado de la banda transportadora.

Figura 36

Zona de paletizado



Nota. En la figura se puede observar la zona en la cual se colocarán los sacos una vez que el robot realice el paletizado.

Selección del brazo robótico físico y determinación de elementos eléctricos para el brazo robótico físico y la banda transportadora.

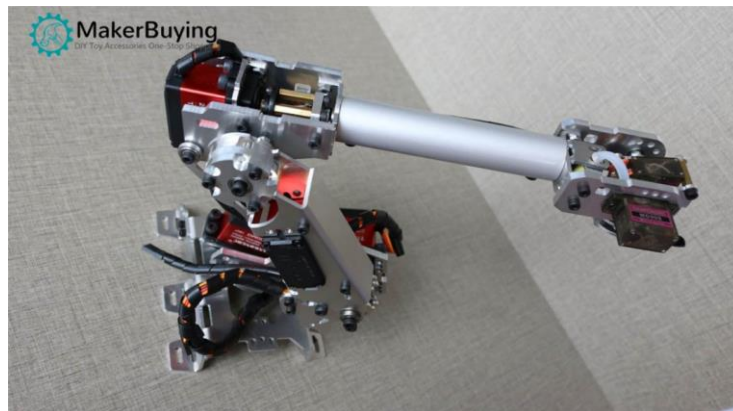
En esta sección se realizará la selección del brazo robótico con el cual se va a trabajar, para lo cual se ha tomado en cuenta las necesidades que debe cubrir el robot, también se ha realizado el diseño de los diferentes elementos eléctricos que serán necesarios para el funcionamiento del robot y la banda transportadora físicos.

Selección del brazo robótico

Se ha seleccionado el brazo robótico SNAM 6900 de 6GDL, el mismo que será utilizado para realizar la tarea de paletizado dentro del proceso de producción de harina, tomando en cuenta que para dicha tarea no es necesaria la exactitud, se necesitara de fuerza, para poder realizar la tarea, por lo cual se ha seleccionado este brazo robótico.

Figura 37

Brazo robótico SNAM 6900



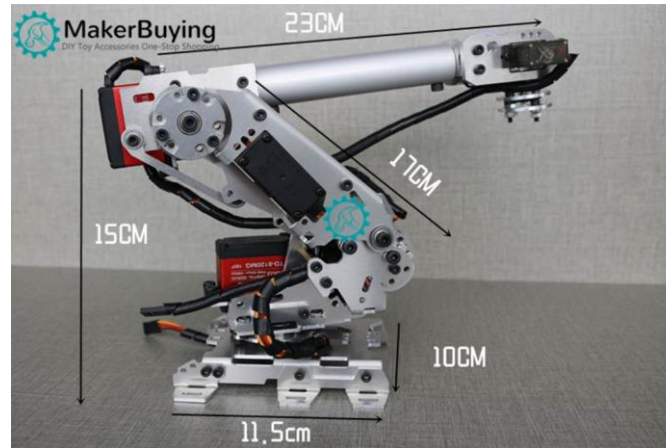
Nota. La imagen muestra el brazo robótico que se va a utilizar. Tomado de (Buying, 2020)

En la figura siguiente, se presenta el brazo robótico SNAM 6900 con cada una de sus dimensiones.

Se debe tomar en cuenta que el brazo robótico seleccionado tiene un alcance máximo de 60cm, las dimensiones del mismo para la estación de trabajo, además se debe tener presente que la capacidad de carga nominal es de 2Kg.

Figura 388

Dimensiones del Brazo robótico SNAM 6900



Nota. La imagen muestra el brazo robótico y sus dimensiones. Tomado de (Buying, 2020)

Servomotor TD-8120MG

A continuación, se presenta las principales características de los servomotores con los que se va a trabajar en cada uno de los grados de libertad del brazo robótico.

Figura 39

Servo motor TD-8120MG



Nota. La imagen presenta los servomotores del brazo robótico. Tomado de (Buying, 2020)

Tabla 2*Especificaciones servo motor TD-8120MG*

Torque máximo	51 onzas-in
Velocidad máxima	0,15s/60 grados
Desplazamiento angular máximo	90 grados
Sistema de control	Analógico, por ancho de pulso
Posición neutral	1,5ms
Voltaje de operación	4,8-6,0 V
Velocidad(6V)	0,15s/60 grados
Torque(4,8V)	42 onzas*in(3kg-cm)
Torque(6V)	51 onzas*in(3,7kg-cm)
Dirección	Multidireccional

Nota. Esta tabla muestra las especificaciones correspondientes a los servomotores del brazo robótico.

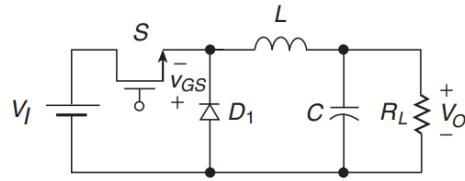
Tomada de (TECmikro, 2019)

Diseño placa PBC convertidor BUCK DC-DC

Un convertidor BUCK DC-DC es utilizado para obtener a su salida un valor de tensión menor al de su entrada, por lo que es necesario para poder dar la alimentación necesaria a los microcontroladores, ya que estos necesitan de 3V en su alimentación respectivamente.

Figura 40

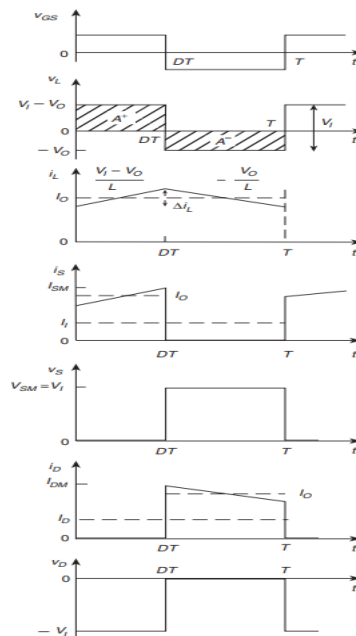
Diagrama universal Convertidor Buck DC-DC



Nota. En la imagen se observa el diagrama universal para un convertido Buck. Tomado de (Kazimierczuk, 2008)

Figura 41

Formas de onda de corriente y voltaje de un convertidor Buck DC-DC



Nota. La imagen muestra las formas de onda y voltaje correspondientes a un convertidor Buck.

Tomado de (Kazimierczuk, 2008)

- Para el convertidor se selecciona un valor estándar comercial de 120-220V con tap

Central a 2A.

- Para los diodos rectificadores se selecciona Diodos Scotty de descarga rápida, con estos diodos lo que se busca es lograr evitar el ruido, las corrientes parásitas, además de evitar los armónicos en componente continua.
- Con la finalidad de soportar una potencia requerida de 150W, y rectificar el voltaje con el menor rizo posible, se selecciona 3 capacitores de 470uF y 1 de 1uF.

$$P = I * V \quad (7)$$

$$P = 120V * 2A \quad (8)$$

$$P = 240W$$

Datos:

V= 24V

Vo=5V

F=54Khz

R=17 Ohm

Cálculos:

Periodo

$$T_s = \frac{1}{f} \quad (9)$$

$$T_s = \frac{1}{54Khz} \quad (10)$$

$$T_s = 1.85185 \times 10^{-5} s$$

Ciclo de trabajo

$$V_o = D * V \quad (11)$$

$$D = \frac{V_o}{V} \quad (12)$$

$$D = \frac{5}{24} \quad (13)$$

$$D = 0.2083$$

Tiempo de encendido

$$T_{on} = D * T_s \quad (14)$$

$$T_{on} = 0.2083 * 1.85185 \times 10^{-5}$$

$$T_{on} = 3.8580 \times 10^{-6} \text{ s}$$

Inductancia

$$L = \frac{(1-D) * T * R}{2} \quad (15)$$

$$L = \frac{(1-0.2083) * 1.85180 \times 10^{-5} * 18}{2} \quad (16)$$

$$L = 27 \mu\text{H}$$

Capacitor

$$C = \frac{(1-D) * T^2}{8 * L * \left(\frac{\Delta V_o}{V} \right)} \quad (17)$$

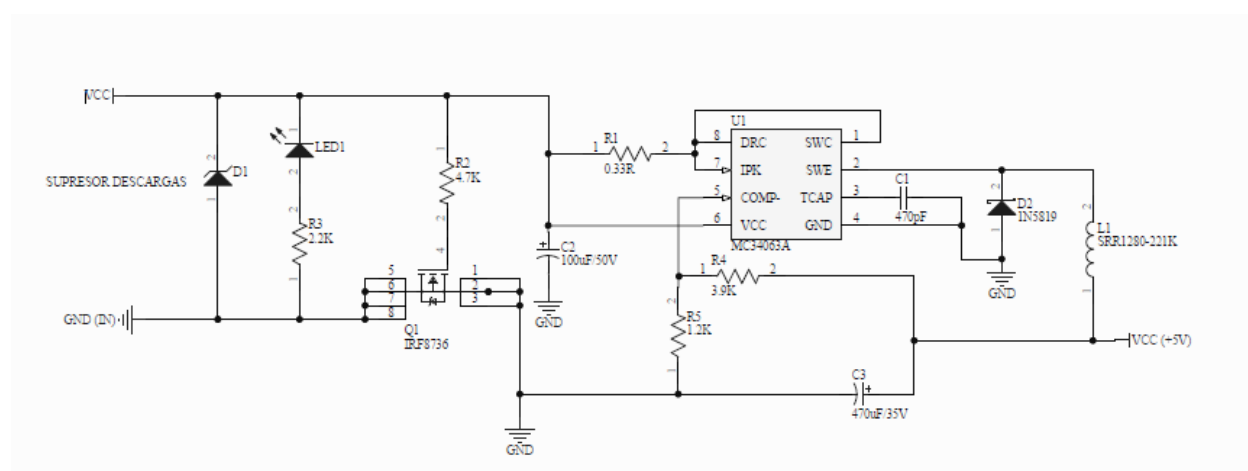
$$C = \frac{(1 - 0.2083) * 1.85185 * 10^{-5}}{8 * 27 * 10^{-6} * 0.01} \quad (18)$$

$$C = 474 \mu F$$

Tomando en cuenta las características mencionadas antes, se procede a realizar el diseño del circuito para el convertidor, el cual se muestra en la siguiente imagen.

Figura 42

Esquemático Convertidor Buck DC-DC



Nota. La imagen muestra el diseño del circuito Buck realizado para la alimentación.

Diseño placa PCB convertidor DC-DC

Se procede a mostrar el diseño realizado para el convertidor DC-DC, el mismo que será utilizado para la alimentación de los servomotores presentes en el brazo robótico SNAM 6900, y para alimentar el motor de la banda transportadora.

Datos:

$V = 24V$

$V_o = 5V$

$F = 54Khz$

$R = 17 \text{ Ohm}$

Cálculos:

Periodo

$$T_s = \frac{1}{f} \quad (19)$$

$$T_s = \frac{1}{54Khz} \quad (20)$$

$$T_s = 1.85185 \times 10^{-5} s$$

Ciclo de trabajo

$$V_o = D * V \quad (21)$$

$$D = \frac{V_o}{V} \quad (22)$$

$$D = \frac{5}{24} \quad (23)$$

$$D = 0.2083$$

Tiempo de encendido

$$T_{on} = D * T_s \quad (24)$$

$$T_{on} = 0.2083 * 1.85185 \times 10^{-5}$$

$$T_{on} = 3.8580 \times 10^{-6} s \quad (25)$$

Inductancia

$$L = \frac{(1-D) * T * R}{2} \quad (26)$$

$$L = \frac{(1-0.2083) * 1.85180 \times 10^{-5} * 18}{2} \quad (27)$$

$$L = 27 \mu H$$

Capacitor

$$C = \frac{(1-D) * T^2}{8 * L * \left(\frac{\Delta V_o}{V} \right)} \quad (28)$$

$$C = \frac{(1-0.2083) * 1.85185 \times 10^{-5}}{8 * 27 \times 10^{-6} * 0.01} \quad (29)$$

$$C = 474 \mu F$$

Carga total de trabajo

Para poder encontrar el valor de carga máxima que debe soportar la placa PCB, se debe medir los valores de corriente para cada elemento cuando están con carga máxima cada uno de los elementos.

Tabla 3*Cálculos carga total*

Componentes	Carga
Servomotores brazo robótico (6x2A)	12A
Servomotores brazo robótico (1x3A)	3A
Controladores	1A
Motor banda	1.79A
Total carga	17.9A

Nota. La tabla muestra las cargas que tendrá que soportar el convertidor

Factor de seguridad recomendado: 1.11

$$Tot_{carga} = 17.9 * 1.11$$

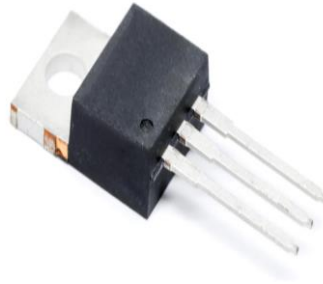
$$Tot_{carga} = 19.869A$$

Selección del Diodo

Conociendo la carga total que debe soportar el convertidor DC-DC, se ha podido seleccionar un diodo WNS30H100C, ya que sus especificaciones cumplen con los requerimientos para soportar la carga total con la cual se va a trabajar, tomando en cuenta que el diodo soporta un corriente de hasta 30A, siendo mayor a la carga total calculada.

Figura 43

Diodo WNS30H100C



Nota. La imagen muestra al diodo seleccionado para el diseño del circuito del convertidor. Tomado de (Mouser, 2018)

Selección del MOSFET

Teniendo en cuenta el valor total de la cara a soportar, se ha seleccionado un MOSFET tipo N IRF3205.

Figura 44

MOSFET IRF3205



Nota. La figura muestra al MOSFET seleccionado para el diseño del convertidor DC-DC. Tomado de (InternationalRectifier, 2017)

Especificaciones

- Disipación total (Pd): 200W
- Tensión (Vds): 55V
- Corriente (Id): 110A
- Temperatura máxima (Tj): 175°C

Características eléctricas

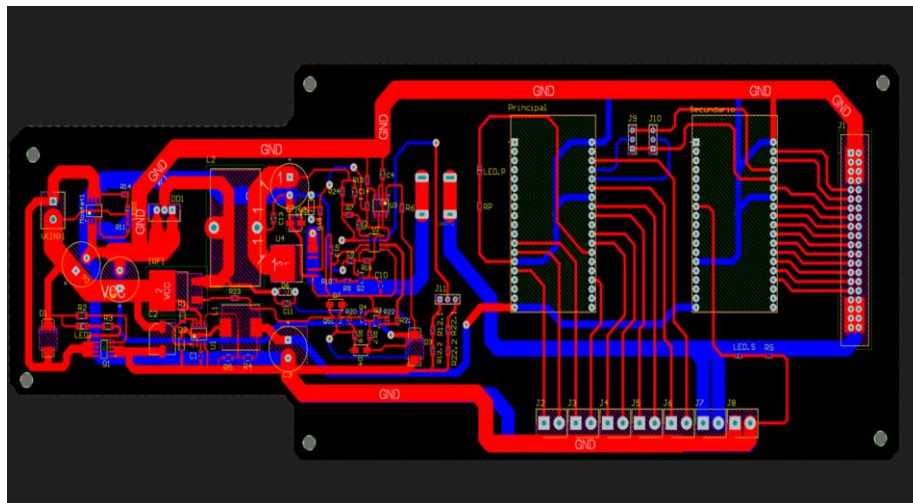
- Tension umbral Vgs(th): 4V
- Carga de compuerta (Qg):146nC
- Tiempo de elevación (tr): 101nS
- RDS: 0.008 Ohm

El circuito diseñado, tiene en su parte inicial un control de polarización inversa, el mismo que nos ayuda a evitar accidentes en caso de errores, y así se protege el circuito de daños graves, mientras que en la segunda parte encontramos el circuito de un convertidor Buck DC-DC, lo que se busca con este convertidor es obtener un valor menor de voltaje en su salida, con el cual se podrá alimentar a los diferentes dispositivos a utilizarse.

Ahora podemos observar cómo se observan las pistas de la PCB del Convertidor DC-DC.

Figura 46

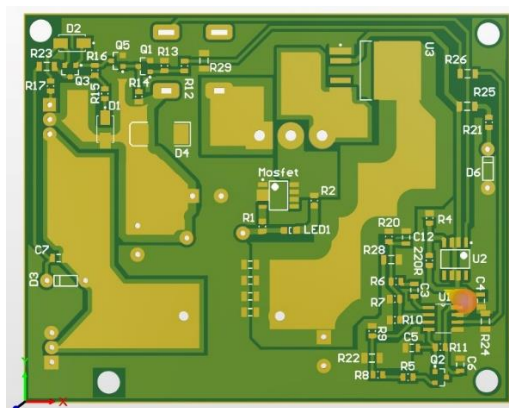
Vista de pistas para la placa PCB del Convertidor DC-DC



Nota. La imagen muestra como se verán las pistas por cada uno de los lados de la placa, representando un lado por las pistas en color rojo, y en azul las pistas de lado contrario de la placa.

Figura 47

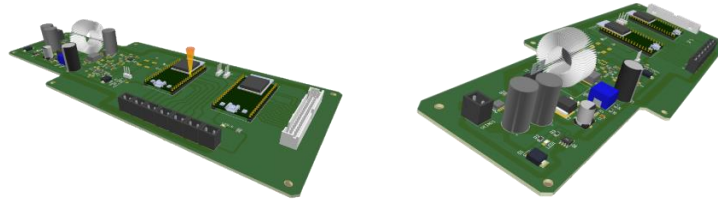
Vista de la placa frontal



Nota. La imagen muestra la vista superior de como se vera la placa PCB del convertidor.

Figura 48

Vista 3D de la placa con los elementos colocados



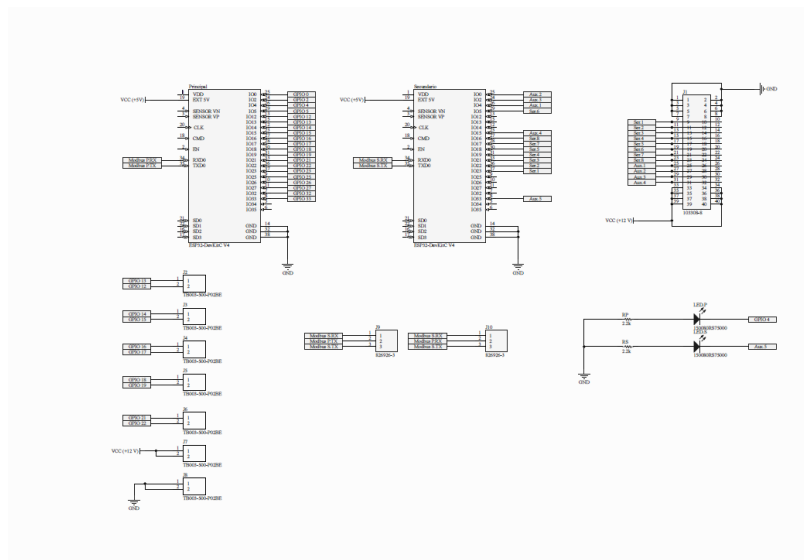
Nota. La imagen muestra como se verá la placa PCB con todos sus componentes.

Esquemático de conexión para microcontrolador

Para poder contar con los microcontroladores dentro de la placa PCB, se ha diseñado un circuito para la ubicación de los mismos, los cuales estarán alimentados directamente en la placa.

Figura 49

Conexión microcontroladores.



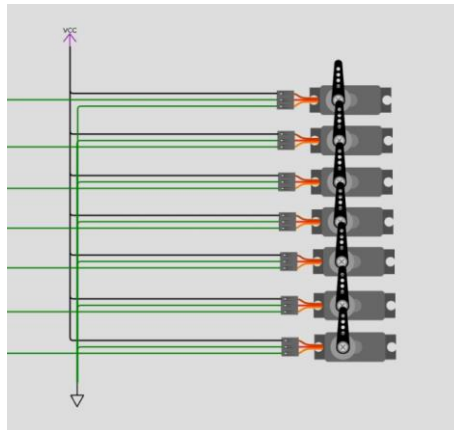
Nota. La imagen muestra el esquema de conexión realizado para los microcontroladores utilizados.

Conexión de Servomotores del brazo robótico SNAM 6900

Para poder realizar el control del brazo robótico se realiza la conexión previa de cada uno de los motores correspondiente a cada grado de libertad del robot.

Figura 50

Diagrama de conexión servomotores



Nota. En la imagen se puede observar la forma en la cual está realizada la conexión de todos los servomotores.

Evaluación del comportamiento de los errores de control de procesos y subprocessos

Para la realización de la evaluación del comportamiento de los errores de control se ha optado por simular cada uno de los procesos dentro del entorno virtual desarrollado en Unity.

Para esto se considera cada etapa de los procesos de la planta como un control distribuido individual, con lo cual se verifica su robustez en la comunicación y control de procesos, sin embargo, el código final de control será implementado en un único PLC, sin embargo para este apartado se ha realizado mediante la simulación con PLCSim Advanced 3.0 y el entorno Unity 3D.

Se podrá observar cada uno de los procesos de manera independiente simulados para la evaluación de errores.

En la imagen a continuación podemos observar la etapa de la molienda, la misma que se ha simulado con un taque, la misma que empieza una vez que el silo se encuentra lleno, una vez este se llena, la válvula de salida se abre y deja pasar el material hasta el motor encargado de realizar la molienda, en esta etapa se ha logrado verificar el correcto funcionamiento de la programación realizada.

Figura 51

Silos y Molienda



Nota. La imagen muestra el proceso de molienda dentro del entorno virtual.

A continuación la imagen muestra la etapa de transporte (bandas transportadoras), aquí se ha procedido a lograr la evaluación de errores a colocar diferentes objetos que representan a los sacos de harina llenos, los mismo que deben ser llevados hasta su ubicación final para el siguiente proceso, mediante la programación realizada se obtuvo los resultados esperados, logrando que los objetos lleguen a la posición deseada para su posterior paletizado.

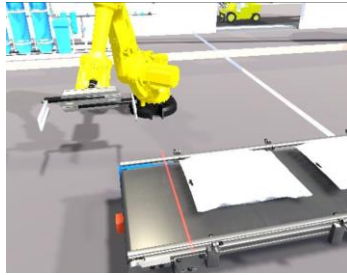
Figura 52

Bandas transportadoras



Nota. La imagen muestra el proceso de transporte con las bandas transportadoras dentro del entorno virtual.

Una vez que el saco lleno de harina es colocado en las bandas transportadoras, transcurrido un lapso de tiempo llegan a la posición del brazo robótico, este toma el saco de harina y lo lleva un nuevo punto para su posterior distribución. Para la evaluación de errores en esta etapa se comprobó el algoritmo de control y su funcionamiento adecuado, logrando que el brazo robótico lleve los objetos que llegan hasta su posición, en dicha posición la banda se detiene por un instante mientras que el robot toma el objeto y lo lleva hasta otra posición, con lo cual se puede decir que el algoritmo implementado funciona de la manera esperada.

Figura 53*Paletizado*

Nota. La imagen muestra el proceso del paletizado de los sacos dentro del entorno virtual.

Diseño del HMI (Human Machine Interface)

El HMI, será una interfaz que permitirá al usuario comunicarse con la planta automatizada. Esta tendrá pantallas, gráficos, menús, botones, entre otros elementos de entrada y salida para poder realizar el monitoreo total de la planta.

El HMI elaborado en el software Nextion, permitirá al usuario entender de una manera fácil y amigable los diferentes datos correspondientes a cada uno de los procesos dentro de la planta, sin embargo se debe tener en cuenta que no se podrá controlar o modificar los parámetros de los diferentes procesos desde este HMI, todo el control estará en el entorno virtual desarrollado.

Figura 54*Pantalla de Inicio*

Nota. En la imagen se puede observar la pantalla de Inicio del HMI, en la misma se puede observar una pequeña gráfica del exterior del entorno virtual de la planta.

Figura 55

Silo de almacenamiento y proceso de molienda



Nota. Podemos observar en la imagen el silo en el cual estará almacenado en un inicio el trigo, el cual pasa a ser molido, este silo tiene sensores, los mismo que indican el nivel, apertura y cierre de válvulas, y el accionamiento del molino.

Figura 56

Extracción de impurezas y almacenamiento para llenado



Nota. Se puede ver en la imagen los dos silos siguientes en los cuales se lleva a cabo la extracción de impurezas y compresión, mientras que en el silo siguiente se almacena la harina para su empaquetado. Cada silo consta de sensores de nivel, apertura y cierre de válvulas de salida, en la parte inferior botones para navegar entre páginas, entre otros.

Figura 57

Almacenamiento final y llenado de sacos.



Nota. La imagen anterior muestra al silo 3, el cual tendrá almacenado el producto final para su empaclado, este silo tiene sus respectivos sensores de nivel, como una válvula de salida, la cual deja caer el harina directo en los sacos para su llenado, una vez que el saco es llenado y sellado, pasa a ser paletizado.

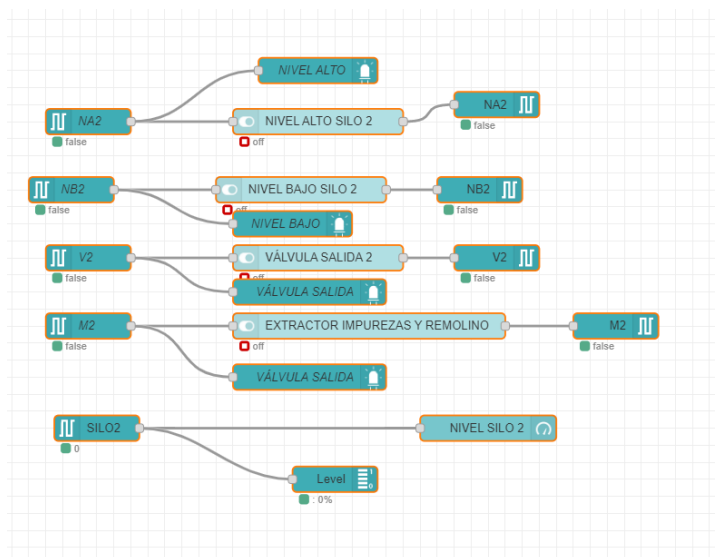
Creación de entorno mediante Node-Red.

Node-Red es un software que ayuda a comunicar el hardware y los servicios, lo cual permite crear un proyecto IoT, permite el trabajo con varias conexiones simultáneas de manera eficaz.

Se debe tener en cuenta que en la plataforma de Node-Red sólo se van a presentar datos correspondientes a cada uno de los diferentes procesos que intervienen en la planta. No se podrá realizar el control de ellas desde esta plataforma, ya que el control estará dentro del entorno virtual desarrollado en el software Unity.

Figura 58

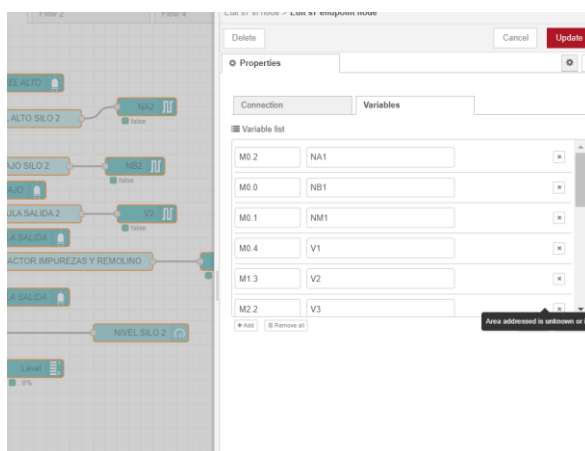
Programación en Node-Red



Nota. En la imagen encontramos como se puede realizar la programación en Node-Red sin tener que escribir ninguna línea de código.

Figura 59

Comunicación con cada tag de los procesos de los procesos



Nota. Se realiza la configuración para la comunicación en cada uno de los tags que se tiene para los diferentes procesos y el software Node-Red.

Figura 60

Lectura de datos y layout diseñado en Node-red



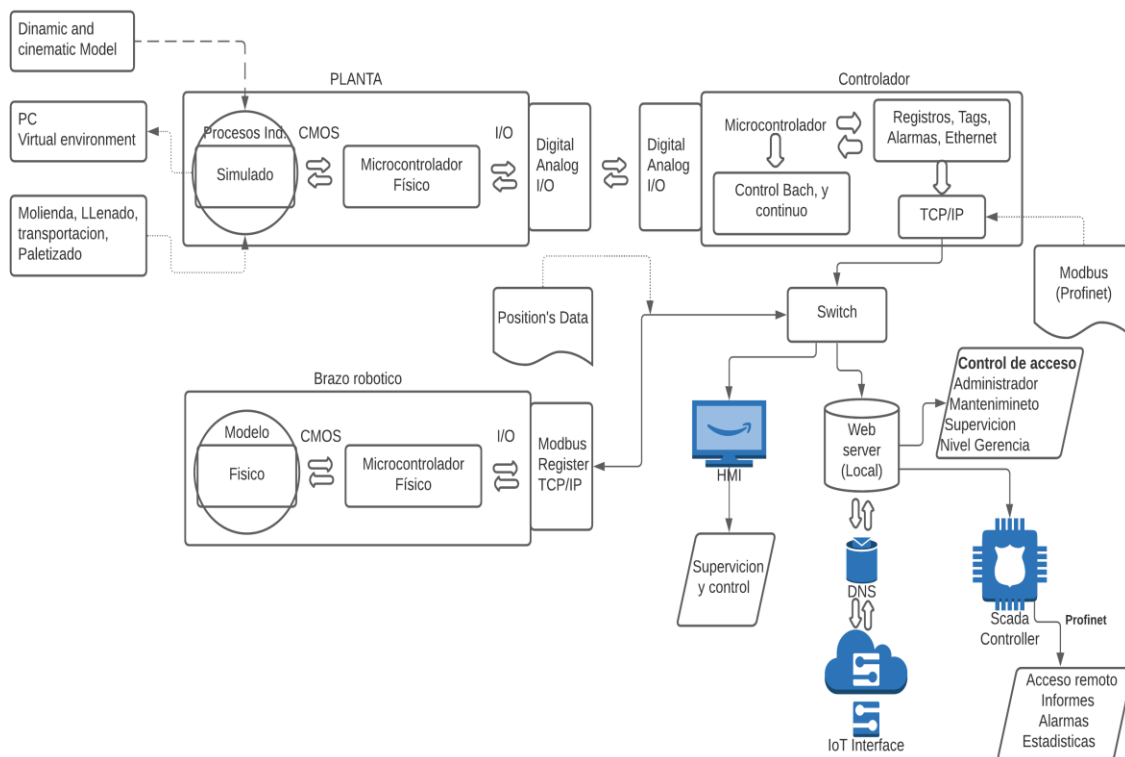
Nota. En la figura podemos ver el layout diseñado mediante el software Node-Red, y a la vez la lectura de los datos de los tags.

Comunicación

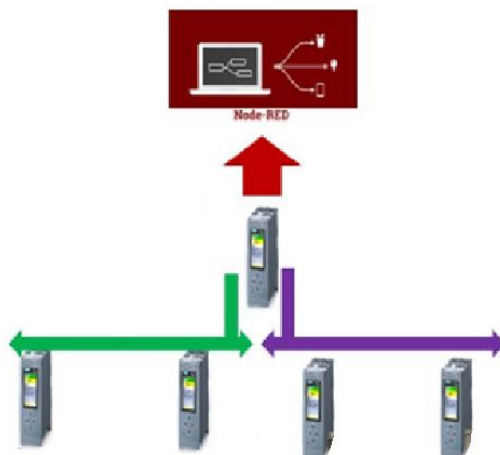
Los datos de supervisión y control serán almacenados en registros, a fin de poder acceder a ellos mediante un servidor web personalizado y local, el mismo que será diseñado para la interfaz gráfica, Trend Data Acquisition y comunicación. Teniendo como principal objetivo supervisar a detalle todos los componentes, fases y acciones sobre la planta desde una página web privada, con control de acceso y esencialmente el control automático y manual de cada etapa del proceso industrial.

Figura 61

Diagrama de comunicación Controlador-Proceso industrial



Nota. La imagen muestra como se realizará toda la comunicación entre el proceso industrial completo y el controlador.

Figura 62*Red sistema SCADA*

Nota. La figura muestra como se realizará la comunicación entre el servidor y los clientes.

Para poder realizar esto se debe seguir los siguientes pasos:

- Se agrega los dispositivos y crea una red en el software Tia Portal mediante el PLCsim

Advanced 3.0.

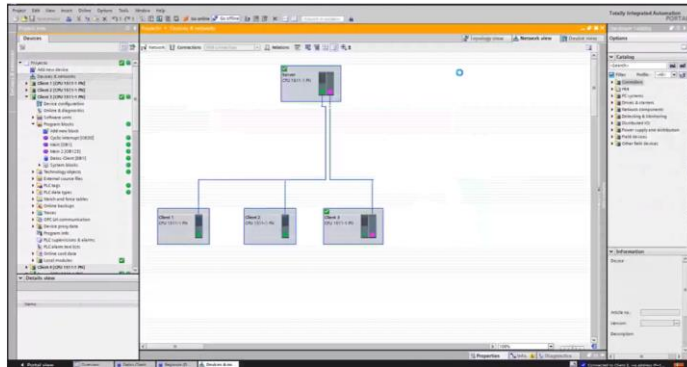
Tabla 4*Direcciones IP de cada cliente*

Dispositivo	IP
Device 1 Server	10.10.10.101
Device 2 Server-Client	10.10.10.102
Device 3 Server-Client	10.10.10.103
Device 4 Server-Client	10.10.10.104

Nota. La tabla muestra las direcciones IP utilizadas para los Clientes y el servidor.

Figura 63

Red sistema SCADA en Tia Portal



Nota. La figura muestra como se va a realizar la Red para la comunicación del sistema SCADA.

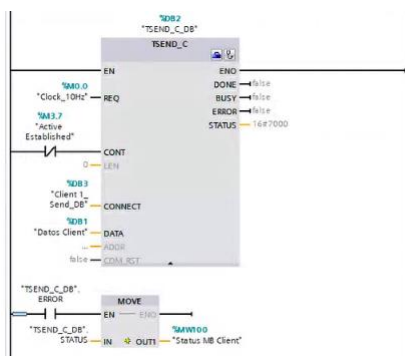
- Luego realizamos la configuración del servidor y los clientes.

Cliente 1

Configuración del bloque para comunicación mediante Modbus, se configura la comunicación del cliente 1, y posterior a esto se configura el bloque DB el mismo que contendrá la base de datos con las variables de control y entrada del proceso de esta base de datos creada, posteriormente se solicitará datos, los mismos que serán mostrados en el HMI y en la comunicación IoT.

Figura 64

Bloque de comunicación Modbus



Nota, la imagen muestra la configuración para la comunicación Modbus del cliente 1.

Figura 65

DB de los datos del cliente 1

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Write...	Visible in ...	Setpoint	Su...
Client 1 NIVEL_TANK_1	Int	0.0	0.0						
Client 1 NIVEL_TANK_2	Int	2.0	0.0						
Client 1 Contador 1	Int	4.0	0.0						
Client 1 Contador 2	Int	6.0	0.0						
Client 1 Contador 3	Int	8.0	0.0						
Client 1 Actuador 1	Bool	10.0	False						
Client 1 Actuador 2	Bool	10.1	False						
Client 1 Actuador 3	Bool	10.2	False						
Client 1 Actuador 4	Bool	10.3	False						
Client 1 Start HMI	Bool	10.4	False						
Client 1 Stop HMI	Bool	10.5	False						
Client 1 Status	Bool	10.6	False						
Client 1 Reset Conters	Bool	10.7	False						
Client 1 Valve 1 ON	Bool	11.0	False						
Client 1 Valve 1 OFF	Bool	11.1	False						
Client 1 Valve 2 ON	Bool	11.2	False						
Client 1 Valve 2 OFF	Bool	11.3	False						
Client 1 Tank 1 reset	Bool	11.4	False						
Client 1 Tank 2 reset	Bool	11.5	False						

Nota. En la imagen se puede observar los datos del cliente 1.

Cliente 2

Configuración del bloque MB_Client con su bloque de datos DB y config(TCON_IP_4). Al igual que en el cliente 1, se configura el bloque para la base de datos, la misma que tendrá las variables de control y entradas, esta misma base de datos será utilizada más adelante para el HMI y la comunicación IoT.

Figura 66

Bloque de datos Client 2

Name	Date type	Start value	Monitor value
Static			
Connection	TCON_IP_v4		
InterfaceId	HW_ANY	64	
ID	CONN_OUC	3	
ConnectionType	Byte	11	
ActiveEstablished	Bool	false	
RemoteAddress	IP_V4		
ADDR	Array[1..4] of Byte		
ADDR[1]	Byte	10	
ADDR[2]	Byte	10	
ADDR[3]	Byte	10	
ADDR[4]	Byte	101	
RemotePort	UInt	502	
LocalPort	UInt	0	

Nota. En la imagen se observa la configuración del bloque de datos realizada para el cliente 2.

Figura 67

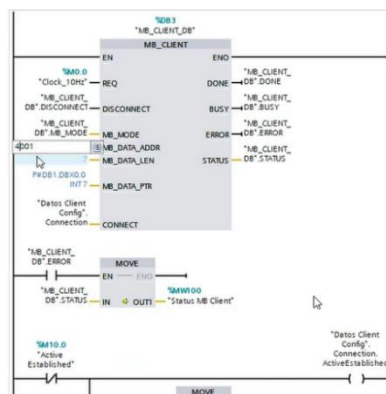
DB de los datos del Cliente 2

Name	Data type	Offset	Start value	Monitor value	Retain	Accessible...	Write...	Visible in...	Setpoint	Supervis...
Static										
Client 2 Sensor	Int	0.0	0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Client 2 SetPoint	Int	2.0	0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Client 2 CV	Int	4.0	0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Client 2 KP	Int	6.0	0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Client 2 KD	Int	8.0	0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Client 2 KD	Int	10.0	0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Client 2 Manual Control	Bool	12.0	false			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Client 2 Value 1	Bool	12.1	false			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Client 2 Value 2	Bool	12.2	false			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Client 2 Start HR	Bool	12.3	false			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Client 2 Stop HR	Bool	12.4	false			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Nota. La imagen muestra los datos del cliente 2 con los cuales se va a trabajar.

Figura 68

Configuración del bloque MB_Client



Nota. La imagen muestra la configuración del bloque MB del cliente 2 y los datos que se moverán.

Cliente 3 y 4

Configuración de bloque para comunicación Modbus, por lo cual la configuración es la misma realizada anteriormente.

Figura 69

DB de los datos del Cliente 3

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Write...	Visible in ...	Setpoint	Supervis...
1	Static								
2	COUNT_Ensembles	Int	0.0	0					
3	RLX	Real	2.0	0.0					
4	RLZ	Real	4.0	0.0					
5	START	Bool	10.0	false					
6	STOP	Bool	10.1	false					
7	LID_AT_PLACE	Bool	10.2	false					
8	BASE_AT_PLACE	Bool	10.3	false					
9	PART_LEAVING	Bool	10.4	false					
10	STOP_SLADE_1	Bool	10.5	false					
11	STOP_SLADE_2	Bool	10.6	false					
12	Ventosa	Bool	10.7	false					

Nota. La imagen muestra los datos del cliente 3 que se podrá ver.

Figura 70

DB de los datos del Cliente 4

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Write...	Visible in ...	Setpoint	Supervis...	Comment
1	Static									
2	Client 3 Sensor	Int	0.0	0						
3	Client 2 setPoint	Int	2.0	0						
4	Client 2 CV	Int	4.0	0						
5	Client 2 KP	Int	6.0	0						
6	Client 2 KI	Int	8.0	0						
7	Client 2 KD	Int	10.0	0						
8	Client 2 Manual Control	Bool	12.0	false						
9	Client 2 Value 1	Bool	12.1	false						
10	Client 2 Value 2	Bool	12.2	false						
11	Client 2 Start M8	Bool	12.3	false						
12	Client 2 Stop M8	Bool	12.4	false						

Nota. La imagen muestra los datos del cliente 4 que se podrá ver.

Server

Luego se realiza la configuración de acuerdo al protocolo utilizado (Modbus), y El server tendrá todas las bases de datos de cada uno de los clientes a través de la red, podrá suministrar información en el caso de ser solicitada o distribuirla si es necesario.

Figura 71

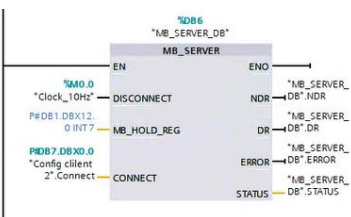
Bloque de Datos (DB) del Server

Name	Data type	Offset	Start value
Static			
Client 1 NIVEL_TANK_1	Int	0.0	0
Client 1 NIVEL_TANK_2	Int	2.0	0
Client 1 Contador 1	Int	4.0	0
Client 1 Contador 2	Int	6.0	0
Client 1 Contador 3	Int	8.0	0
Client 1 Actuador 1	Bool	10.0	false
Client 1 Actuador 2	Bool	10.1	false
Client 1 Actuador 3	Bool	10.2	false
Client 1 Actuador 4	Bool	10.3	false
Client 1 Start HMI	Bool	10.4	false
Client 1 Stop HMI	Bool	10.5	false
Client 1 Status	Bool	10.6	false
Client 1 Reset Conters	Bool	10.7	false
Client 1 Valve 1 ON	Bool	11.0	false
Client 1 Valve 1 OFF 1	Bool	11.1	false
Client 1 Valve 2 ON	Bool	11.2	false
Client 1 Valve 2 OFF	Bool	11.3	false
Client 1 Tank 1 reset	Bool	11.4	false
Client 1 Tank 2 reset	Bool	11.5	false
Client 2 Sensor	Int	12.0	0
Client 2 Set Point	Int	14.0	0
Client 2 CV	Int	16.0	0
Client 2 KP	Int	18.0	0
Client 2 KI	Int	20.0	0
Client 2 KD	Int	22.0	0
Client 2 Manual Control	Bool	24.0	false
Client 2 Valve 1	Bool	24.1	false
Client 2 Valve 2	Bool	24.2	false
Client 2 Start HMI	Bool	24.3	false
Client 2 Stop HMI	Bool	24.4	false

Nota. La imagen muestra todos los datos de los clientes que van a estar dentro del servidor.

Figura 72

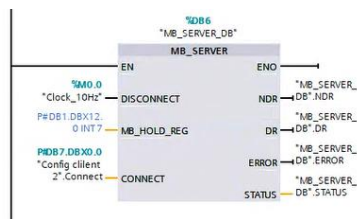
Bloque de comunicación Modbus-Cliente 2



Nota. La imagen muestra la configuración del bloque de comunicación Modbus del cliente 2.

Figura 73

Bloque de comunicación Modbus Cliente 3

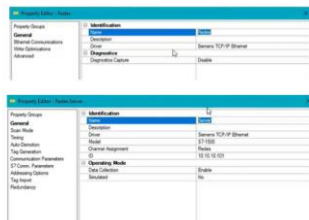


Nota. La imagen muestra la configuración del bloque de comunicación Modbus del cliente 3.

Configuración KEPSERVER

Para el uso del software KEPSERVER, se crean un canal para poder realizar la lectura de los tags correspondientes a los datos con los cuales se va a trabajar.

Figura 74

Configuración KEPSERVER.

Nota. En la figura se puede observar la configuración realizada, el PLC y canal creados para la lectura de los tags.

Figura 75

Configuración de tags

Name	Data Type	Direction
00000000	Boolean	None
00000001	Boolean	None
00000002	Boolean	None
00000003	Boolean	None
00000004	Boolean	None
00000005	Boolean	None
00000006	Boolean	None
00000007	Boolean	None
00000008	Boolean	None
00000009	Boolean	None
00000010	Boolean	None
00000011	Boolean	None
00000012	Boolean	None
00000013	Boolean	None
00000014	Boolean	None
00000015	Boolean	None
00000016	Boolean	None
00000017	Boolean	None
00000018	Boolean	None
00000019	Boolean	None
00000020	Boolean	None
00000021	Boolean	None
00000022	Boolean	None
00000023	Boolean	None
00000024	Boolean	None
00000025	Boolean	None
00000026	Boolean	None
00000027	Boolean	None
00000028	Boolean	None
00000029	Boolean	None
00000030	Boolean	None
00000031	Boolean	None
00000032	Boolean	None
00000033	Boolean	None
00000034	Boolean	None
00000035	Boolean	None
00000036	Boolean	None
00000037	Boolean	None
00000038	Boolean	None
00000039	Boolean	None
00000040	Boolean	None
00000041	Boolean	None
00000042	Boolean	None
00000043	Boolean	None
00000044	Boolean	None
00000045	Boolean	None
00000046	Boolean	None
00000047	Boolean	None
00000048	Boolean	None
00000049	Boolean	None
00000050	Boolean	None
00000051	Boolean	None
00000052	Boolean	None
00000053	Boolean	None
00000054	Boolean	None
00000055	Boolean	None
00000056	Boolean	None
00000057	Boolean	None
00000058	Boolean	None
00000059	Boolean	None
00000060	Boolean	None
00000061	Boolean	None
00000062	Boolean	None
00000063	Boolean	None
00000064	Boolean	None
00000065	Boolean	None
00000066	Boolean	None
00000067	Boolean	None
00000068	Boolean	None
00000069	Boolean	None
00000070	Boolean	None
00000071	Boolean	None
00000072	Boolean	None
00000073	Boolean	None
00000074	Boolean	None
00000075	Boolean	None
00000076	Boolean	None
00000077	Boolean	None
00000078	Boolean	None
00000079	Boolean	None
00000080	Boolean	None
00000081	Boolean	None
00000082	Boolean	None
00000083	Boolean	None
00000084	Boolean	None
00000085	Boolean	None
00000086	Boolean	None
00000087	Boolean	None
00000088	Boolean	None
00000089	Boolean	None
00000090	Boolean	None
00000091	Boolean	None
00000092	Boolean	None
00000093	Boolean	None
00000094	Boolean	None
00000095	Boolean	None
00000096	Boolean	None
00000097	Boolean	None
00000098	Boolean	None
00000099	Boolean	None
00000100	Boolean	None

Nota. Podemos observar en la figura cada uno de los tags creados, con su respectivo tipo de datos y su dirección.

Figura 76

Configuración entre KEPSEVER y Nextion Editor



Nota. en la imagen se realiza la configuración correspondiente para poder trabajar con los datos de los tags creados en KEPSEVER.

Pruebas de funcionamiento

Para poder evaluar el funcionamiento de los procesos se ha planteado las siguientes pruebas:

- Curvas de respuesta del controlador del brazo robótico.
- Pruebas de carga para la placa PCB diseñada.
- Tiempo de molienda para trituración del material en simulación.
- Tiempo de apertura y cierre de válvulas de salida de silos.
- Tiempo de paletizado físico vs entorno virtual.
- Pruebas de ubicación del brazo robótico.

- Pruebas de comunicación entre Unity 3D y PLC S71200 AC/DC/RLY

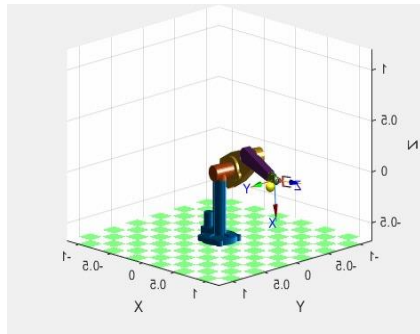
Cada una de las diferentes pruebas se las ha hecho con las cargas máximas que se puede tener, para así poder encontrar los diferentes tiempos y errores posiblemente generados.

Curvas de respuesta del controlador del brazo robótico

Para esta prueba se ha realizado la simulación con el controlador diseñado mediante el uso de Matlab, para lo cual se ha ingresado una posición final a la cual debe llegar el brazo robótico, y de aquí se obtendrá las curvas del comportamiento del controlador diseñado.

Figura 777

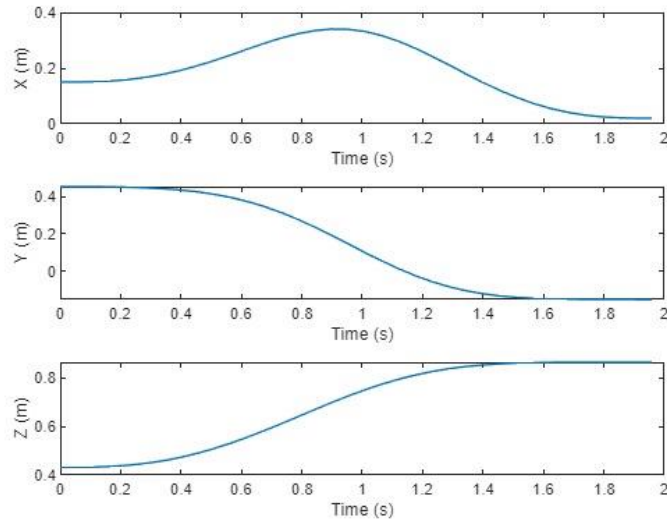
Posición final brazo robótico



Nota. La imagen muestra al robot en una posición específica.

Figura 78

Evaluación de errores de control



Nota. La imagen muestra los errores de control en los ejes X, Y, Z del brazo robótico.

Una vez realizado la simulación de los errores de control podemos decir:

La evolución de los errores de control en el eje X en el transcurso del tiempo, se puede ver como oscila en un inicio, pero rápidamente tiende a cero en un corto intervalo de tiempo, por lo cual se puede decir que el control implementado funciona correctamente.

Los errores de control en el eje Y dentro de un intervalo de tiempo, al igual que en el eje X tienden a cero, se podría decir que incluso evoluciona más rápido que en el eje X, verificando así que el controlador funciona de manera adecuada.

El error de control en el eje Z al igual que en los ejes X e Y, tiene rápidamente a cero, el controlador trabaja correctamente.

De esta manera se puede decir que el controlador diseñado e implementado para el brazo robótico de 6GDL funciona correctamente y realiza los movimientos deseados dentro de los parámetros establecidos.

Pruebas de carga para la placa PCB

Para la prueba se ha realizado la conexión de todos los motores que se encontrarán en la parte física. Para esto se ha ido accionando diferentes servomotores, haciendo que el brazo robótico se coloque en diferentes posiciones, y se ha observado los valores de corriente generados, para esto se ha enumerado a cada uno de los servomotores en el robot del 1 al 8, en el accionamiento de la banda, se ha colocado diferentes cargas sobre ella y se ha obtenido los valores de corriente generados. Para la realización de esta prueba se debe tener en cuenta que el voltaje con el cual se trabaja es un voltaje fijo con un valor de rizado del 0.5.

Figura 79

Pruebas de carga



Nota. En la imagen se puede observar algunas de las variaciones de corriente con cargas en los servomotores del brazo robótico.

Tabla 5*Pruebas de carga.*

Cargas	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Banda	0.2 A	0.35 A	0.95 A	1.06 A	1.65 A
M1	0.01A	0.03 A	0.4 A	0.3 A	0.39 A
M2	0.02 A	0.02 A	0.35 A	0.24 A	0.35 A
M3	0.01 A	0.03 A	0.2 A	0.6 A	0.53 A
M4	0.01 A	0.02 A	0.1 A	0.4 A	0.41 A
M5	0.01 A	0.01 A	0.2 A	0.31 A	0.38 A
M6	0.03 A	0.02 A	0.27 A	0.37 A	0.5 A
M7	0.04 A	0.02 A	0.19 A	0.35 A	0.45 A
M8	0.01 A	0.03 A	0.28 A	0.3 A	0.49 A

Mediante las diferentes pruebas realizadas sobre las cargas en cada uno de los motores, se puede llegar a la conclusión que el consumo de corriente en cada servomotor, específicamente los que se encuentran en el robot, es la misma en todos ellos, ya que son del mismo modelo, sin embargo la poca diferencia entre ellos se debe a la fuerza física realizada por nosotros oponiéndonos al movimiento de los servos para su consumo de corriente. No así en el caso del motor de la banda al ser diferente del resto consume más corriente de acuerdo a la carga que deba mover.

Se calcula la varianza para comprobar de forma matemática que la desviación estándar tiende a cero.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

$$\bar{X} = \frac{0.39 + 0.35 + 0.53 + 0.41 + 0.38 + 0.5 + 0.45 + 0.49}{8} \quad (40)$$

$$\bar{X} = 0.4375$$

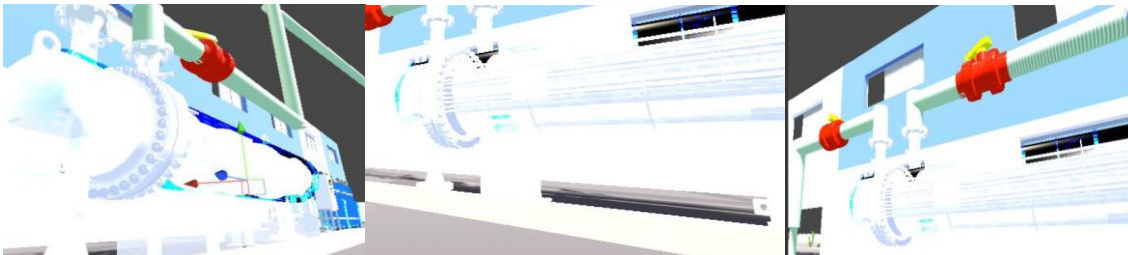
$$\sigma = 0.01595$$

Tiempo de molienda para trituración del material

Para esta prueba realizada la simulación de envío del material al proceso de molienda, tomando el tiempo con cronómetro, basándose en el nivel del primer silo, ya que de este dependerá la cantidad de material que pase al proceso de molienda para la trituración. La tabla 6 se muestra a continuación

Figura 80

Prueba de funcionamiento de molienda.



Nota. en la imagen se puede observar las pruebas de funcionamiento para el proceso de la molienda en el entorno virtual.

Tabla 6

Tiempo de molienda del material.

Activación Molino	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Nivel silo Alto	25.2 s	27.01 s	25.45 s	26.05 s
Nivel silo 25% menor al nivel alto	20.6 s	19.08 s	19.83 s	20.45 s
Nivel silo medio	17.3 s	17.04 s		16.99 s
Nivel silo bajo	5.03 s	5.09 s		4.95 s

Como se ha observa en la tabla 6, una vez realizadas las pruebas de los tiempos de molienda del material al variar los niveles del silo de almacenamiento, se ha tomado el tiempo máximo de molienda en cada uno de las pruebas.

$$T_{\max NVH} = 26.05s$$

$$T_{\max NVM} = 17.3s$$

$$T_{\max NVL} = 5.09s$$

$$T_{\max NV25\%off} = 20.6s$$

Donde:

TmaxNVH es el tiempo máximo cuando el silo está en nivel alto.

TmaxNVM es el tiempo máximo cuando el silo está en nivel medio.

TmaxNVL es el tiempo máximo cuando el silo está en nivel bajo.

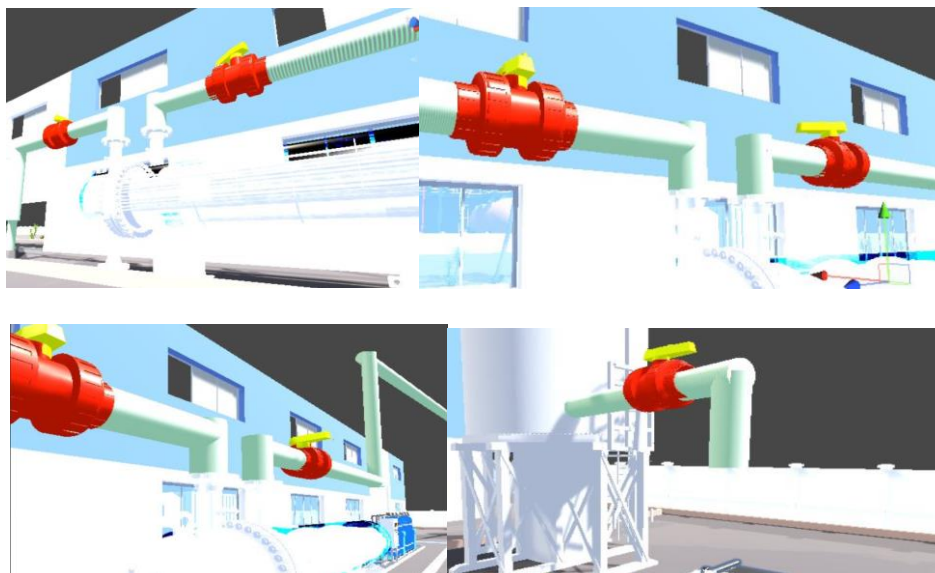
TmaxNV25%off es el tiempo máximo cuando el silo está en un nivel 25% menor al nivel alto.

Tiempo de apertura y cierre de las válvulas de salida de silos.

Para realizar esta prueba se ha realizado la apertura y cierre de las válvulas, con lo cual se verifica el tiempo que tardan cada una de ellas en abrirse y cerrar, para estos se ha enumerado a cada una de las válvulas del 1 al 3, con el número 3 la válvula encargada del llenado. Para la toma de los tiempos se ha utilizado un cronómetro.

Figura 81

Prueba de funcionamiento apertura y cierre de válvulas.



Nota. Podemos observar en la imagen las pruebas de funcionamiento realizadas para la apertura y cierre de las válvulas.

Tabla 7

Tiempo de molienda del material.

Válvulas	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
V1	4.91 s	4.35 s	5.1 s	4.3 s	4.9 s
V2	4.7 s	4.5 s	4.9 s	4.62 s	4.99 s
V3	5.03 s	4.97 s	5 s	4.95 s	5.01 s

Los tiempos de cada una de las válvulas no difieren el uno del otro, por lo que se podría decir que son los mismos, para esto se encuentra la desviación estándar y se encuentra que tan cercanos están entre sí, omitiendo los valores de la válvula 3, ya que esta es para el llenado y es una válvula más pequeña.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

$$\bar{X} = \frac{4.9 + 4.99}{2} \quad (41)$$

$$\bar{X} = 4.945$$

$$\sigma = 0.081$$

Con esto podemos observar que la desviación estándar se acerca al 0, con lo cual se puede decir que los resultados casi no difieren entre ellos.

Con las pruebas realizadas con el tiempo de cierre y apertura de las válvulas, podemos concluir que debido a que las válvulas 1 y 2 son las mismas, los tiempos son muy parecidos, sin embargo se nota una ligera diferencia, la cual puede ser incluso un error humano en el uso del cronómetro cuando se

toma el tiempo. Pero la válvula 3 no está en el mismo caso, ya que está tiene un tiempo mayor, debido a que es de menor tamaño.

De igual manera, se realiza el mismo cálculo para comprobar la desviación estándar.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

$$\bar{X} = \frac{5.03 + 4.97 + 5 + 4.95 + 5.01}{5} \quad (42)$$

$$\bar{X} = 4.97$$

$$\sigma = 0.077$$

Tiempo de paletizado físico vs simulado

Para esta prueba de paletizado, se ha comparado el tiempo que se tarda en paletizar el robot físico y el robot simulado, cronometrando cada uno de ellos, por lo cual se ha utilizado dos cronómetros en esta prueba.

Figura 822

Prueba de funcionamiento tiempo de paletizado.



Nota. En la figura podemos observar las pruebas realizadas para la comparación de tiempo en el

proceso de paletizado, al igual que las gráficas de las trayectorias que siguió el brazo robótico en el entorno virtual.

Tabla 8

Tiempo de paletizado.

Paletizado	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Simulado	6.5 s	6.9 s	6.4 s	6.7 s	6.57 s	6.8 s
Físico	6.8 s	7.3 s	6.9 s	7.1 s	7 s	7.21 s

Una vez realizadas las pruebas, se ha obtenido los datos presentados en la tabla 7 correspondiente al paletizado, con lo cual se ha calculado un tiempo promedio para cada caso, el mismo que se muestra a continuación.

$$T_{pF} = \frac{6.8 + 7.3 + 6.9 + 7.1 + 7 + 7.21}{6}$$

$$T_{pF} = 7.05s$$

$$T_{pS} = \frac{6.5 + 6.9 + 6.4 + 6.7 + 6.57 + 6.8}{6}$$

$$T_{pS} = 6.84s$$

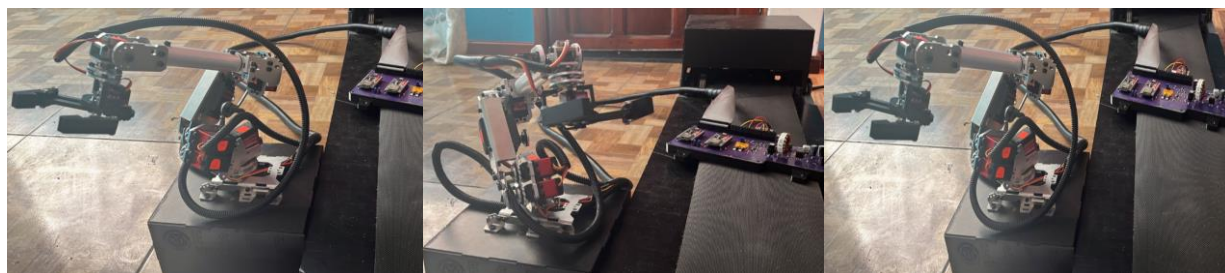
Con esto podemos encontrar el error entre la parte física y la simulación del paletizado, obtenido como resultado un 3% de error en el tiempo que se realiza el paletizado en físico, con eso podemos concluir que el paletizado físico tarda un poco más de tiempo, esto debido a que la comunicación no llega de manera inmediata.

Pruebas de ubicación del brazo robótico.

Para poder realizar esta prueba, se ha procedido a mover cada una de las articulaciones del brazo robótico, verificando el tiempo que ha tardado y el valor deseado vs el valor real.

Figura 83

Prueba de funcionamiento ubicación del brazo robótico.



Nota. En la figura podemos observar las pruebas realizadas para la comparación de tiempo en el proceso de paletizado.

Tabla 9

Movimiento primera articulación 45°

Pruebas	Grados °	Tiempo
1	25	0.2 s
2	35	0.4 s
3	40	0.42 s
4	42	0.42 s
5	43	0.42 s
6	35	0.41 s
7	42	0.45 s

Figura 84

Prueba de funcionamiento para el movimiento del robot.

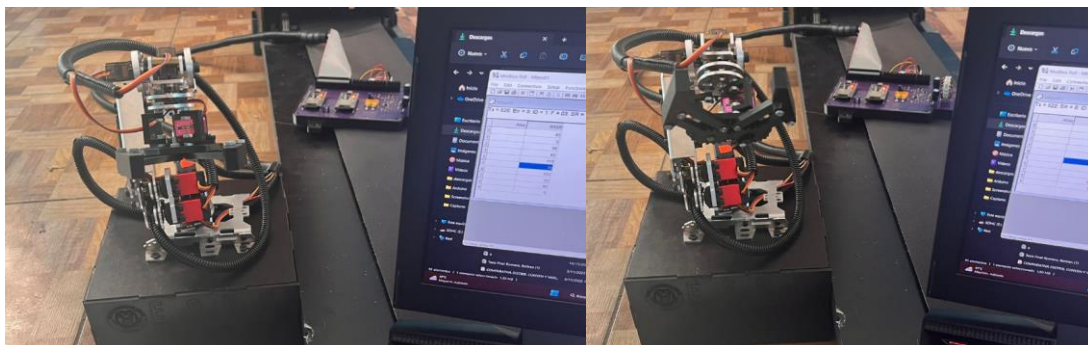


Nota. Podemos observar en la figura las pruebas realizadas para la verificación de la ubicación del robot en las diferentes articulaciones.

Como se ha podido observar en los valores de la tabla 8, en las primeras pruebas realizadas del control del robot en la primera articulación, el valor deseado respecto al valor real tiene un error aproximado del 3.5%, esto debido al control del brazo robótico.

Figura 85

Movimiento de la primera articulación.



Nota. En la imagen podemos ver la variación de ángulos en la primera articulación.

Tabla 10

Movimiento segunda articulación 45°

Pruebas	Grados °	Tiempo
1	39	0.32s
2	38	0.32 s
3	40	0.35 s
4	41	0.4 s
5	42	0.41 s
6	43	0.4 s
7	43	0.4 s
8	43	0.4 s

Con los valores obtenidos en la tabla anterior, podemos ver como el valor deseado y el valor real del movimiento de la segunda articulación tiene un error aproximado del 4.44%, obtenido así un mejor control en está articulación.

Figura 86

Movimiento tercera articulación.



Nota. En la imagen 88 podemos ver los movimientos de la tercera articulación.

Tabla 11

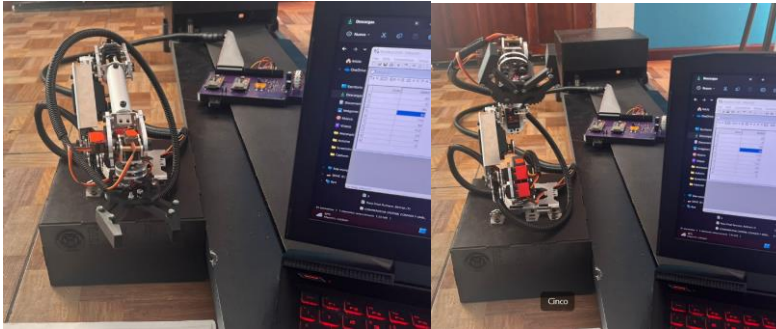
Movimiento tercera articulación 45°

Pruebas	Grados °	Tiempo
1	41	0.5 s
2	42	0.43 s
3	41	0.45 s
4	43	0.4 s
5	42	0.4 s
6	43	0.44 s
7	44	0.46 s
8	44	0.46 s

De los datos obtenidos antes, podemos decir que existe un error máximo de 4° en las diferentes pruebas realizadas, dando esto un error aproximado del 2.22% entre el valor deseado y el real.

Figura 87

Movimiento de cuarta articulación.



Nota. se puede observar los movimientos en la cuarta articulación.

Tabla 12

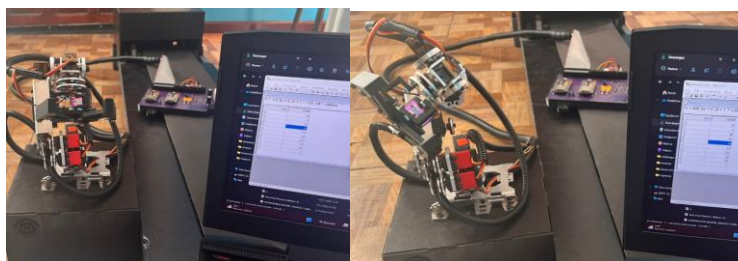
Movimiento cuarta articulación 45°

Pruebas	Grados $^\circ$	Tiempo
1	42	0.4 s
2	44	0.41 s
3	43	0.39 s
4	44	0.43 s
5	43	0.5 s
6	44	0.4 s
7	45	0.4 s
8	45	0.4 s

De los datos obtenidos en la tabla 12 mostrada anteriormente, podemos observar que se ha tenido como resultado una diferencia máxima de 3° entre el valor deseado y el que se ha obtenido, esto nos da como resultado un error del 1.11%.

Figura 88

Movimiento de la quinta articulación.



Nota. Podemos observar el movimiento en la quinta articulación del brazo robótico.

Tabla 13

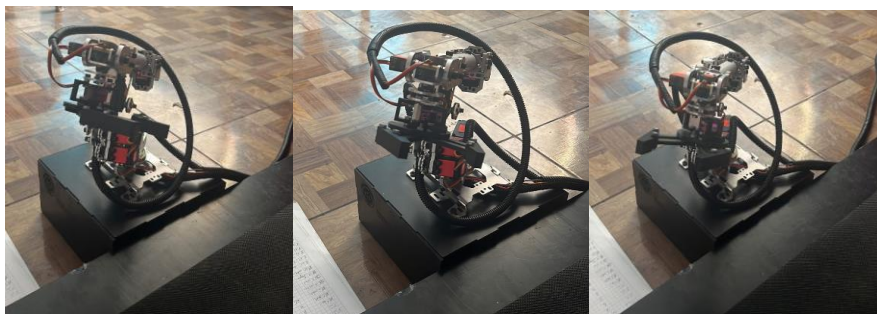
Movimiento quinta articulación 45°

Pruebas	Grados	Tiempo
1	44	0.4 s
2	43	0.43 s
3	45	0.4 s
4	44	0.41 s
5	45	0.43 s
6	44	0.41 s
7	43	0.41 s
8	45	0.4 s

Una vez terminadas las pruebas, se procede a comparar el valor que se deseaba obtener y el valor obtenido al realiza el movimiento, concluyendo de esta manera que se tiene un error aproximadamente del 1.84%.

Figura 89

Movimiento de la sexta articulación.



Nota. Se puede ver el movimiento en la sexta articulación del brazo robótico.

Tabla 14

Movimiento sexta articulación 45°

Pruebas	Grados	Tiempo
1	44	0.3 s
2	44	0.38 s
3	45	0.39 s
4	45	0.4 s
5	43	0.42 s
6	44	0.4 s
7	45	0.4 s
8	47	0.4 s

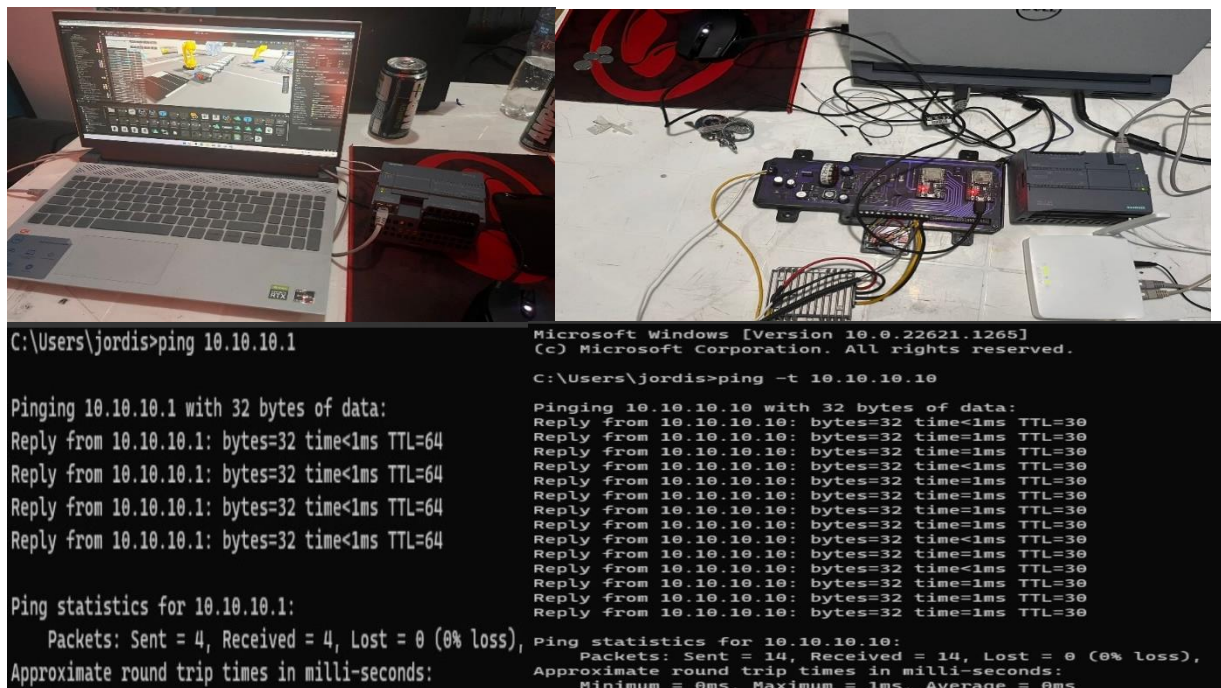
De los datos encontrados al realizar la prueba para la sexta articulación se puede decir que tenemos una variación máxima de 2° al valor que se deseaba obtener, con esto encontramos el error aproximado, el cual es de 0.83%.

Pruebas de comunicación entre Unity 3D y PLC S71200 AC/DC/RLY

Para la realización de estas pruebas se ha procedido a cargar toda la programación realizada para la automatización de los procesos al PLC S7 1200, para posteriormente poner en funcionamiento el entorno virtual, y evaluar los tiempos de comunicación.

Figura 90

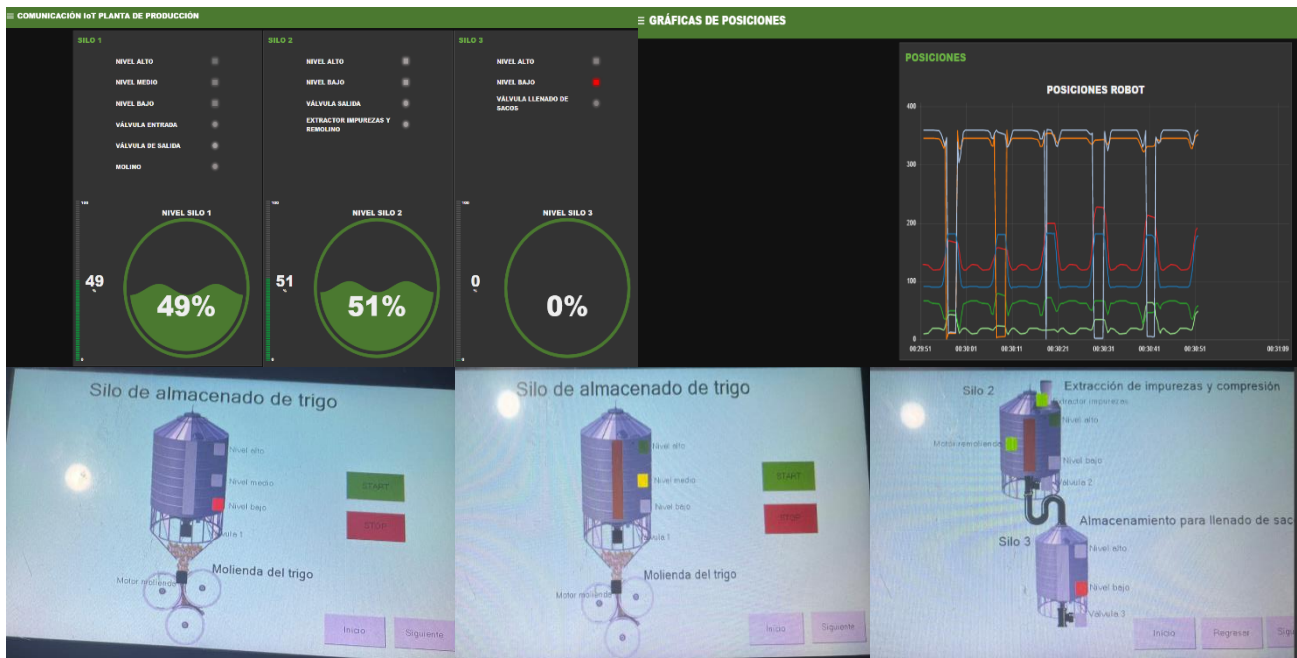
Comunicación entre Unity 3D y PLC S7 1200



Nota: en la figura 90 se puede observar las pruebas realizadas para evaluar la comunicación entre el entorno virtual en Unity 3D y el PLC s7 1200.

Figura 91

Pruebas comunicación IoT y HMI



Nota. En la imagen 91 se puede ver el funcionamiento de la comunicación IoT en tiempo real, tanto como los niveles correspondientes a cada silo, los indicadores de los sensores y actuadores, y la gráfica de posiciones correspondiente a los movimientos realizados por el brazo robótico.

Una vez terminadas las pruebas de comunicación podemos decir que el tiempo de retraso es muy bajo, por lo cual la comunicación se realiza en tiempo real, tomando en cuenta que el retraso llega a ser menor a 1 ms, la comunicación es de excelente calidad y permite realizar todo el proceso sin ningún problema.

Mientras que la comunicación IoT se ejecuta de manera adecuada, mostrando los niveles de cada silo, incluso mostrando los movimientos realizados por cada articulación del brazo robótico, al igual que en el HMI se puede ver en el llenado de cada silo, con sus sensores y actuadores en tiempo real.

Capítulo IV

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

La técnica hardware in the loop es una herramienta sumamente útil para la identificación de métodos de control, así como el hardware adecuado para el control a una planta de determinada frecuencia, para este caso práctico en particular, se propuso utilizar un microcontrolador ESP32-WROOM32D, para el control único del brazo robótico.

Los modelos matemáticos que rigen el comportamiento de las distintas etapas de este proceso industrial, por lo general son lineales y secuenciales, la única diferencia del brazo robótico, que es un sistema complejo determinado como MIMO, la misma que rige su comportamiento en función de las características físicas de su modelo considerado en la etapa de diseño.

Los algoritmos de control para el proceso secuencial de las etapas tales como, molienda, purificación, llenado, transportación, son secuenciales, por lo que no se necesita un controlador de altas frecuencias, sin embargo, se requiere almacenar información de registros y alarmas para presentación de datos a nivel SCADA. Por este motivo se opta el uso de un PLC, a fin de almacenar información, y realizar una comunicación efectiva bajo protocolo Modbus TCP/IP.

Es factible simular los estados y comportamiento de distintos objetos modelados matemáticamente en Unity, bajo la premisa que el entorno permite interactuar con los modelos como Objetos, y se puede asignar variables ya sea para el control de sus propiedades o lectura de su entorno.

El sistema de control propuesto es estable y robusto acorde los objetivos de diseño. Los procesos secuenciales, cumplen su etapa de acuerdo a la lógica de control y no suscitan errores en su

ejecución, además que el brazo robótico se controla con una precisión superior a la que se requiere originalmente.

El diseño electrónico y de potencia es una herramienta muy importante para el correcto funcionamiento de los sistemas electromecánicos, por lo que las especificaciones de potencia consideradas en el diseño, no se salieron de límite, garantizando su estabilidad y robustez en el funcionamiento del brazo robótico y demás.

Los datos obtenidos por los sensores y variables de control se presentan en el servidor web en tiempo real, con retardo promedio de 20ms a nivel MES, 10ms a nivel SCADA, y 1ms a nivel de control. Por lo que se considera que el seguimiento del proceso es en tiempo real.

EL desempeño del proceso completo, es eficiente y adecuado, lo que significa que el uso de un sistema virtual, para diseñar el control de una planta industrial y luego implementarlo de forma física es sumamente factible y poco costoso, además que reduce tiempo de paro en la producción.

Recomendaciones

Para el uso de esta técnica, se debe considerar los parámetros físicos de cada etapa de control, a fin de diseñar un algoritmo de control estable y robusto. Esto debido a que por lo general no se considera el ruido o efectos ambientales en la etapa de modelación de planta debido a su complejidad.

Para las etapas de control secuencial, que tienen múltiples entradas y salidas digitales, no es necesario un controlador de altas prestaciones, a menos que también se vaya a ocupar para un proceso extra, como el registro de datos control a frecuencias superiores a su procesador.

La capa física de comunicación entre los microcontroladores debe ser programada correctamente, a fin de garantizar su reconexión, resincronización, reincorporación y la no pérdida de

control sobre el proceso industrial ejercido. Ya sea por fallas de cortes de luz, sobrecarga, errores de memoria o avería del microcontrolador.

Usar Cinemática inversa con los parámetros DH para generar los puntos de trayectoria y programar el microcontrolador, es una forma sencilla y eficaz, de modo que se obtiene los ángulos de giro para llegar a la posición deseada.

El controlador del del brazo robótico, debe ser dedicado, y no se debe usar con propósito de controlar otra subrutina dentro de su programación, para evitar la falta de fluidez en sus trayectorias, que para este proyecto, se cambia los datos del DB del robot, mediante interrupciones, para garantizar el control continuo del proceso.

Bibliografía

- AFHSE. (2009, Abril 24). *Artes blancas*. Retrieved from <https://www.artesblancas.com/proceso-productivo-de-la-harina/>
- ATRIA. (2019, Octubre 22). *Atria Innovation*. Retrieved from <https://www.atriainnovation.com/que-son-las-redes-neuronales-y-sus-funciones/>
- Bacic, M. (2005). On hardware-in-the-loop simulation. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 3194-3198). Sevilla: IEEE.
- Barrientos, A. (1997). *Fundamentos de Robótica*. Madrid: McGraw-Hill.
- Buying, M. (2020). *Maker Buying*. Retrieved from <https://www.makerbuying.com/product/mechanical-arm-metal-aluminum-alloy-industrial-robot-model-six-axis-robot-201-arduino>
- Camarillo, A. (2021, Junio 2). Retrieved from <https://blog.330ohms.com/2021/06/02/que-es-un-control-pid/>
- Consulting, F. &. (2009, 04 24). *Artes Blancas*. Retrieved from <https://www.artesblancas.com/proceso-productivo-de-la-harina/>
- COPADATA. (2017). *COPADATA*. Retrieved from <https://www.copadata.com/es/productos/zenon-software-platform/visualizacion-control/que-significa-hmi-interfaz-humano-maquina-copadata/>
- Deusens. (2018, Diciembre 28). *Deusens Hiperexperiencia*. Retrieved from <https://deusens.com/es/blog/hitos-historia-realidad-virtual>

- FIB. (2014, Marzo 22). *Universidad Politécnica de Catalunya*. Retrieved from <https://www.fib.upc.edu/retro-informatica/avui/realitatvirtual.html>
- Frutos, L. (2015). *Desarrollo de algoritmos de control avanzado para dispositivos programables industriales*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Galileo. (2019, Noviembre 25). *Universidad Galileo*. Retrieved from <https://www.galileo.edu/trends-innovation/la-importancia-del-internet-de-las-cosas-dentro-de-una-empresa-segun-informes/>
- Hernández, M. (2012). *Cinémática de Robots*. <https://nbio.umh.es/files/2012/04/practica2.pdf>.
- InnovaciónDigital360. (2022, Octubre 6). *Innovación Digital 360*. Retrieved from <https://www.innovaciondigital360.com/i-a/robotica-industrial-que-es-como-funciona-y-areas-de-aplicacion/>
- International Rectifier. (2017). *International Rectifier*. Retrieved from <https://alltransistors.com/es/mosfet/transistor.php?transistor=2363>
- Jojob, J. M. (2011). *Instalación de robots paletizadores en líneas de envasado en una planta industrial*. Buenos Aires: Instituto Tecnológico de BUenos Aires.
- Kazimierczuk, M. (2008). *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*. Dayton: Wiley.
- Microcyber. (2018). *MICROCYBER*. Retrieved from http://es.microcyber-fieldbus.com/product/pressure-transmitter-capacitance-sensor?fbclid=IwAR20cs5KgaOW8gpYC2hyTN9_MgkL534VuinBNQzJ3FUOs8tjp2y-dZvb-g
- Moreta, M. (2015, Noviembre 29). *Revista Líderes*. Retrieved from <https://www.revistalideres.ec/lideres/consumo-harina-ecuador-toneladas-molinos.html>

- Mouser. (2018). *Mouser Electronics*. Retrieved from <https://www.mouser.ec/ProductDetail/WeEnSemiconductors/WNS30H100CQ?q=qpJ%252B%252B%252Bdg6p29IJ3dsDYcYg%3D%3D>
- National Instruments. (2020, Marzo 14). *National Instruments*. Retrieved from <https://www.ni.com/es-cr/innovations/white-papers/17/what-is-hardware-in-the-loop-.html>
- Noguera, B. (2020, Diciembre 4). *IQR*. Retrieved from <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/12/sistemas-de-control-automatico-introduccion.html>
- Rosas, A. O. (2018). *Programación de PLC, HMI y comunicaciones en la industria*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Royappa, A. (2000, Marzo 01). *ACM digital library*. Retrieved from <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1852563.1852594>
- SDINDUSTRIAL. (2019). *sdindustrial*. Retrieved from <https://sdindustrial.com.mx/blog/hmi/>
- TECmikro. (2019). *TECmikro*. Retrieved from https://tecmikro.com/content/73-servo-servomotor-pic?fbclid=IwAR3E6eSBrfNfc_-4rgD13tPQGEstP5KswBoW6GOeaRqslgXVnz2M7d5EB6k#:~:text=Los%20servo%20motores%20generalmente%20trabajan,ubique%20en%20su%20posici%C3%B3n%20neutral
- Tomra. (2016, Agosto 2). *TOMRA*. Retrieved from <https://languagesites.tomra.com/es-es/sorting/alimentacion/por-que/automatizacion/>
- UNIR. (2017). *UNIR*. Retrieved from <https://www.unir.net/ingenieria/revista/robotica-industrial/>
- UNIR. (2022). *La Universidad en internet*. Retrieved from <https://www.unir.net/ingenieria/revista/robotica-industrial/>

Vaca, A. (2015). *Diseño e Implementación de un algoritmo de control avanzado aplicado a un proceso de presión* . Latacunga: ESPE.

Anexos