

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Repotenciación del sistema de control de pesos de producto para una divisora de bollería en una  
industria alimenticia

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingenieros en Mecatrónica**

Presentado por:

José Fernando García Rivera

Wilsinton Emanuel Ortega Vega

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## Dedicatoria

---

Dedico el presente trabajo a Dios, ser al que pido guía para alcanzar mis metas y aspiraciones en la vida.

A mi papá, Santo Teodoro, por el apoyo que he recibido para no darme por vencido en las diferentes etapas de mi vida.

A mis hermanos David y Benjamín, para alentarlos a lograr las metas que también se propongan.

A mis compañeros y amigos, que hicieron de mi vida universitaria una experiencia agradable.

A la ESPOL y sus profesores, quienes nos han brindado recursos, impartido conocimientos, moldeado nuestro pensamiento y pulido nuestras habilidades para ser excelentes profesionales.

**José García**

## Dedicatoria

---

El presente proyecto lo dedico primero a Dios, quien me ha dado sabiduría a lo largo de la carrera.

A mis padres, Wilsinton Ortega y Martha Vega, quienes me han apoyado y brindado de sabiduría para no darme por vencido y así poder alcanzar mis metas.

A mi hermana, quien me ha ayudado de manera incondicional cuando la he necesitado.

A mis amigos y compañeros, con los que he compartido las mejores experiencias en la universidad

A la ESPOL y sus profesores, quienes no han dado todos los recursos y conocimientos necesarios para ser excelentes profesionales

**Wilsinton Ortega**

## Agradecimientos

---

Agradezco a Dios, por la sabiduría, inteligencia y perseverancia para llegar a este último peldaño de vida universitaria del pregrado.

A mi padre Santo García, por ser mi principal apoyo y pilar fundamental en la vida.

A Gary Jordán, quien se ha convertido en un maestro a nivel personal y profesional, además que fue un gran apoyo en este proyecto.

A mis compañeros de trabajo, por aligerar mi carga laboral y por su contribución, mientras realizaba la experimentación del proyecto.

Es preciso decirles que, para mí, el agradecimiento es la memoria del corazón.

**José García**

## Agradecimientos

---

Mi más sincero agradecimiento a Dios, quien me ha dado la sabiduría y me ha ayudado a alcanzar mis metas,

A mi familia, quienes me apoyaron en cada etapa de mi vida.


A mi compañero de tesis, José García, porque con su ayuda y esfuerzo, fue posible realizar este proyecto.

**Wilsinton Ortega**

## Declaración Expresa

---

Los derechos de titularidad y explotación nos corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; José Fernando García Rivera y Wilsinton Emanuel Ortega Vega damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



---

José García Rivera



---

Wilsinton Ortega Vega

## **Evaluadores**

---

**Carlos Xavier Saldarriaga Mero, Ph.D.**

Profesor de Materia

---

**Marcelo Rodolfo Fajardo Pruna, Ph.D.**

Tutor de proyecto

## Resumen

El avance tecnológico se ha convertido en un factor clave para la competitividad y el éxito empresarial en las industrias de consumo masivo a nivel nacional e internacional. Sin embargo, a diferencia de otros países, Ecuador no ha experimentado un avance tecnológico significativo en este sector. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto es mejorar la eficiencia y calidad en la producción de pan a través de la actualización tecnológica de las máquinas, centrándose en la mejora del sistema de control de peso para reducir las pérdidas de producto y mejorar la calidad del producto final.

En el desarrollo del proyecto, se describe el proceso de migración tecnológica, que incluye la evaluación de los equipos existentes, la identificación de las necesidades de actualización y la selección de nuevos equipos. Se destaca la implementación exitosa del nuevo sistema de control de peso. Como resultado de estos esfuerzos, se logró una migración tecnológica exitosa y un uso más eficiente de la materia prima. Este proyecto tiene el potencial de impulsar la competitividad de la industria panificadora en Ecuador, al alinearla con estándares tecnológicos modernos y mejorar la calidad de sus productos.

**Palabras Clave:** Migración tecnológica, control de peso, calidad, industria alimenticia.



### **Abstract**

*Technological progress has become a key factor for competitiveness and business success in the mass consumption industries, both nationally and internationally. However, unlike other countries, Ecuador has not experienced significant technological progress in this sector. Therefore, the objective of this project is to improve efficiency and quality in bread production through technological upgrading of the machines, focusing on improving the weight control system to reduce product losses and improve the quality of the final product.*

*The project describes the technological migration process, which includes the evaluation of existing equipment, the identification of upgrade needs, and the selection of new equipment.*

*The successful implementation of the new weight control system is highlighted. As a result of these efforts, a successful technology migration and a more efficient use of raw materials were achieved. This project has the potential to boost the competitiveness of Ecuador's bakery industry by aligning it with modern technological standards and improving the quality of its products.*

*Keywords: Technological migration, weight control, quality, food industry.*

## Índice general

Resumen .....	I
Abstract .....	II
Índice general .....	III
Abreviaturas .....	VI
Simbología .....	VII
Índice de figuras .....	VIII
Índice de tablas .....	X
Capítulo 1 .....	1
1.1    Introducción.....	2
1.2    Descripción del problema.....	2
1.3    Justificación del problema .....	4
1.4    Objetivos.....	8
1.4.1    Objetivo general .....	8
1.4.2    Objetivos específicos.....	8
1.5    Marco teórico.....	9
1.5.1    Proceso de producción .....	9
1.5.2    Funcionamiento de la etapa de corte y control de peso.....	10
1.5.3    Estado del arte .....	12
Capítulo 2 .....	15

2.1	Metodología.....	16
2.1.1	Selección de la alternativa de la solución.....	16
2.2	Proceso de diseño .....	18
2.3	Requerimientos de diseño.....	20
2.4	Diseño conceptual.....	20
2.5	Diseño mecánico.....	22
2.6	Diseño eléctrico .....	22
2.7	Sistema de Control.....	27
2.7.1	Parámetros de monitoreo y control .....	27
2.7.2	Controlador del sistema.....	30
2.7.3	Arquitectura de control.....	31
Capítulo 3	.....	33
3.1	Resultados.....	34
3.1.1	Diseño mecánico .....	34
3.1.2	Diseño eléctrico.....	35
3.1.3	Sistema de control .....	38
3.1.4	Resultados finales.....	47
3.2	Análisis .....	48
3.2.1	Análisis de costos .....	48
Capítulo 4	.....	50
4.1	Conclusiones y recomendaciones .....	51
4.1.1	Conclusiones .....	51

4.1.2	Recomendaciones.....	51
	Referencias.....	53
	Apéndice.....	56

### Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PLC	Programmable Logic Controller
INEC	Instituto Nacional De Estadística Y Censo
Fenepan	Federación Nacional de Panificadores
PID	Control Proporcional Integral Derivativo

## Simbología

g	Gramo
kg	Kilogramo
v	Voltaje
DC	Corriente continua
AC	Corriente alterna
A	Amperios

## Índice de figuras

Figura 1.1 Histograma de valores de peso del primer producto.....	5
Figura 1.2 Variación porcentual de pesos mensuales del primer producto.....	5
Figura 1.3 Histograma de valores de peso del segundo producto .....	6
Figura 1.4 Variación porcentual de pesos mensuales del segundo producto .....	6
Figura 1.5 Histograma de valores de peso del tercer producto .....	7
Figura 1.6 Variación porcentual de pesos mensuales del tercer producto .....	7
Figura 1.7 Proceso de producción de pan .....	10
Figura 1.8 Etapa de corte y control de peso .....	11
Figura 1.9 Pantalla de operación de la divisora de bollería .....	12
Figura 1.10 Controladora de bajo peso C33 PlusLine WD .....	13
Figura 2.1 Metodología de diseño.....	19
Figura 2.2 Diseño conceptual del sistema.....	21
Figura 2.3 Alimentación de servomotores VPL según el manual de fabricante .....	23
Figura 2.4 Conexión de servodrive y servomotores actuales.....	23
Figura 2.5 Conexión de entradas y salidas digitales del servodrive y módulos del PLC.....	24
Figura 2.6 Esquema eléctrico de conexión para servodrive y servomotor a usar en la migración.....	25
Figura 2.7 Obtención de parámetros en la curva sigmoideal .....	28
Figura 2.8 Contantes de Ziegler y Nichols – Método 1 .....	29
Figura 2.9 Contantes de Ziegler y Nichols – Método 2 .....	29
Figura 2.10. Switches administrables con CIP Sync.....	32
Figura 2.11 Topología de red del proyecto .....	32
Figura 3.1 Acople mecánico en el eje del servomotor original y en el nuevo .....	34
Figura 3.2 Diseño 3D del acople tipo araña .....	35

Figura 3.3 Diagrama eléctrico.....	36
Figura 3.4 Conexión del Kinetix 5500 y servomotor VPL .....	37
Figura 3.5 Conexión realizada para obtener la señal de indexación .....	38
Figura 3.6 Gráfica de la salida del sistema con una entrada de tipo escalón .....	38
Figura 3.7 Obtención de los parámetros del primer método de Ziegler y Nichols .....	39
Figura 3.8 Constantes usadas por defecto para el control PID del tornillo .....	40
Figura 3.9 Señal de presión obtenida con las constantes por defecto de la máquina.....	40
Figura 3.10 Primera modificación de constantes usando Ziegler Nichols .....	41
Figura 3.11 Señal obtenida luego de aplicar Ziegler y Nichols .....	41
Figura 3.12 Constantes corregidas para el control PID del tornillo .....	42
Figura 3.13 Señal obtenida con las constantes corregidas del método de Ziegler y Nichols.....	42
Figura 3.14 Procedimiento para realizar autotune en variadores PowerFlex 525.....	43
Figura 3.15 RSLogix 500 y Studio 5000.....	44
Figura 3.16 Diagrama de flujo de la lógica de programación que usa el sistema de corte .....	45
Figura 3.17 Características del movimiento aplicado en cada indexación .....	46
Figura 3.18 Configuración de entradas digitales del drive ULTRA 3000 .....	46
Figura 3.19 Configuración de salidas digitales del drive ULTRA 3000.....	46
Figura 3.20 Configuración de las características de movimiento para el servomotor en Studio 5000.....	47
Figura 3.21 Grafica de la variación porcentual de peso en el mes de agosto.....	48



## Índice de tablas

Tabla 2.1. Criterios de selección .....	17
Tabla 2.2 Matriz de decisión de las soluciones .....	18
Tabla 2.3 Requerimientos del sistema.....	20
Tabla 2.4 Lista de componentes eléctricos implicados en la migración .....	26
Tabla 2.5 Controlador PLC SLC 5/05.....	30
Tabla 2.6 Controlador Logix5575 .....	31
Tabla 3.1 Cotización de componentes usado en el proyecto.....	49

# Capítulo 1

## **1.1 Introducción**

El avance tecnológico se ha convertido en un factor clave en las industrias de consumo masivo para la competitividad y el éxito empresarial a nivel nacional e internacional. Las empresas pueden aumentar la eficiencia, reducir costos y aumentar la confiabilidad de sus equipos mediante el uso de tecnologías avanzadas [1]. Sin embargo, la falta de actualización tecnológica en el sector de las empresas panificadoras puede resultar en problemas que afectan el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos.

El peso del producto final es un factor importante en la industria panificadora. Dado que el incumplimiento de este puede resultar en la pérdida de todo un lote de productos, el peso adecuado es esencial para asegurar la calidad y la comercialización del producto. En general, una empresa del sector de alimentos enfrenta un desafío al tener que gestionar el uso de su materia prima para evitar pérdidas económicas en la elaboración de su producto.

En Ecuador, la innovación tecnológica en las industrias alimenticias no ha avanzado al mismo ritmo que en otros países desarrollados. Esto crea una brecha entre las empresas que utilizan tecnología antigua y las que tienen tecnología actualizada. Como resultado, las empresas que no han actualizado su tecnología tienen problemas más graves en términos de calidad y eficiencia [2].

En este contexto, el proyecto actual se centra en migrar y actualizar la tecnología antigua para la optimización del control de peso de una máquina divisora de bollería. El objetivo de usar una tecnología más actual es para maximizar el rendimiento de la máquina divisora mejorando la gestión del mantenimiento en cuanto a refacciones de maquinaria y asegurarse de que cumpla con los estándares de calidad establecidos en la industria panificadora.

## **1.2 Descripción del problema**

La planta panificadora del cliente elabora alrededor de 7 tipos diferentes de producto en sus respectivas líneas de producción que son: bollería, moldes, tortillas, secos, panquelería,

apanadura y para ciertas temporadas se habilita la línea de pascua, cuyos productos se distribuyen a nivel nacional para su consumo [3]. Sin embargo, a diferencia de otras líneas que utilizan tecnología más avanzada, la sección de extrusión y corte de la línea de producción de bollería presenta un problema importante. Esta sección utiliza maquinaria automatizada que no ha sido actualizada desde el año 2005. Provocando que la máquina divisora de bollería presente una variación significativa en el peso de las bolas de masa, superando el  $\pm 3\%$  de variación con respecto al peso objetivo del producto. Esta situación ocasiona una pérdida económica cuando el peso excede el rango establecido y, por otro lado, cuando el peso es insuficiente, el producto no cumple con los estándares de calidad para su comercialización.

Este proyecto se enfoca en el diseño e implementación de un sistema de control más efectivo en la cuchilla del equipo que permita un corte más preciso. Además, se debe mejorar la gestión del mantenimiento del equipo, asegurando que los componentes se encuentren actualizados con la tecnología estándar que utiliza el cliente en sus equipos de planta. De esta manera, se llevará un mejor control de los repuestos, para su solicitud y salida de bodega.

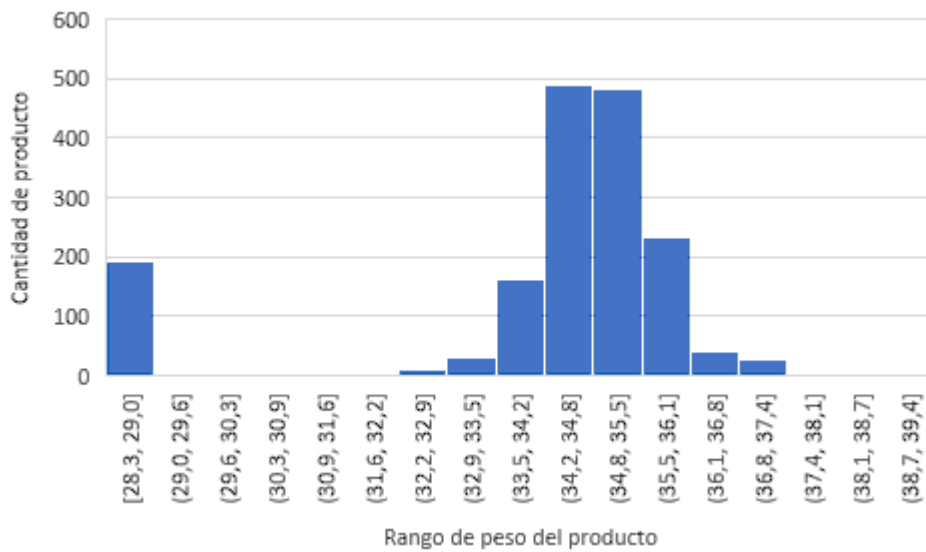
### 1.3 Justificación del problema

La compañía elegida para llevar a cabo este proyecto es una multinacional conocida con sede en Ecuador que se dedica a la elaboración de productos alimenticios como panes, dulces y bizcochos, entre otros. La empresa se encuentra dentro de las 100 mejores marcas del país dentro del sector alimenticio, generando un ingreso de 77 millones de dólares en el año 2019 [4]. En su planta de producción, hay varias estaciones que utilizan tecnología moderna y antigua. Sin embargo, se ha descubierto que la tecnología antigua se utiliza en la estación previa al pesado del producto, lo que resulta en una variación de peso mayor a la esperada en las masas. En la sección de corte se usa un servovariador Kinetix Ultra 3000, Rockwell Automation anuncia que, a partir de diciembre de 2022, la producción de los servovariadores Ultra™ 3000 Boletín 2098 Kinetix® será interrumpida y ya no estarán disponibles para la venta. Para apoyar su transición, el fabricante recomienda que se migre a alguno de los otros productos de servovariadores actuales.

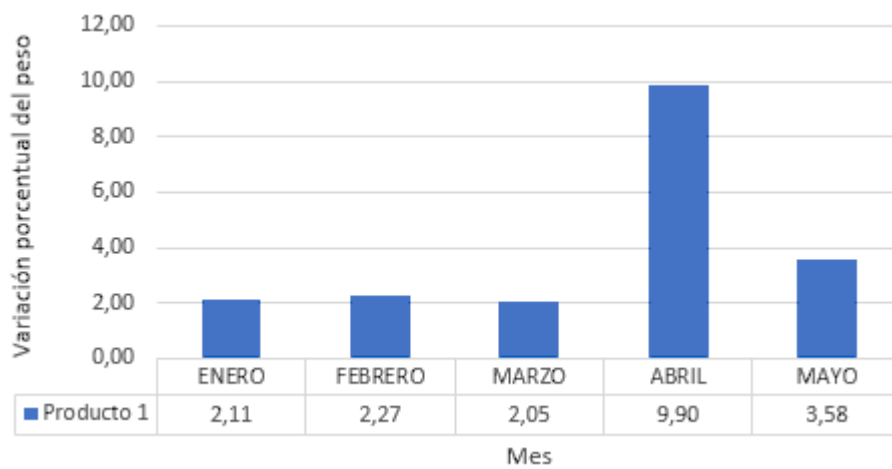
Adicionalmente se tiene datos de los pesos de 3 diferentes productos, en los últimos 5 meses del presente año, los cuales son los que generan mayor variación. Como se puede observar con el primer producto, tanto en la Figura 1.1 como en la Figura 1.2, se observa un histograma de los valores de peso obtenidos y una gráfica de la variación porcentual del peso respectivamente. Para el primer producto, se tiene un peso objetivo de 34.5, sin embargo, en la Figura 1.1 se observa que la tendencia de los valores del peso no está dentro del parámetro deseado, debido a eso, este producto presenta una variación porcentual promedio de peso del 6,57% entre enero y mayo de este año tal como se muestra en la Figura 1.2.

**Figura 1.1**

*Histograma de valores de peso del primer producto*

**Figura 1.2**

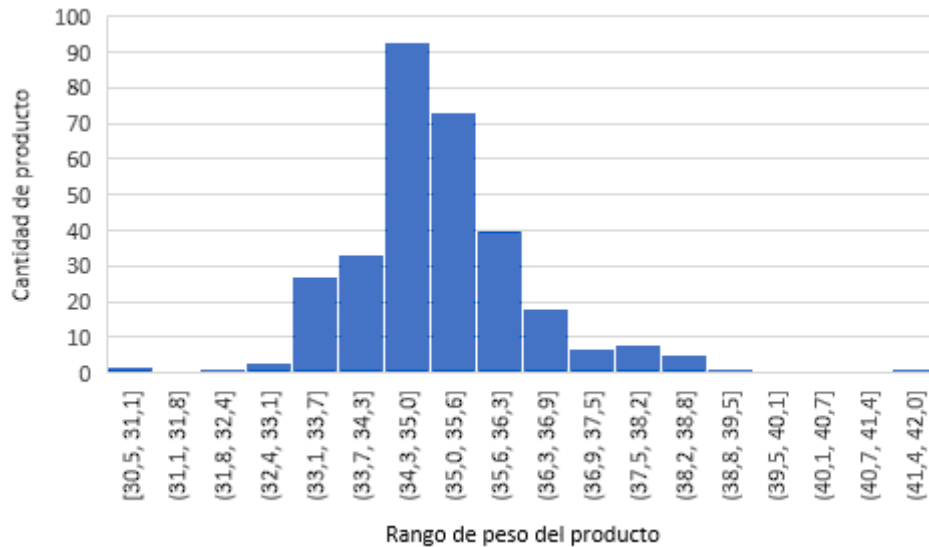
*Variación porcentual de pesos mensuales del primer producto*



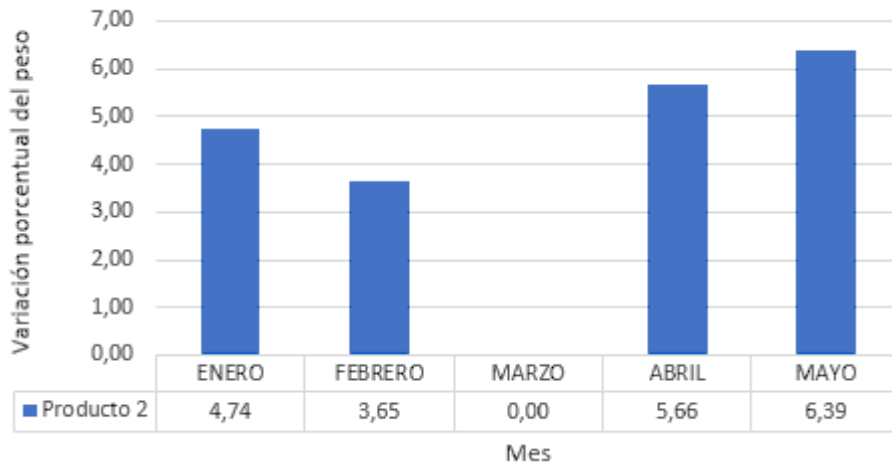
Para el segundo producto se observa mediante la Figura 1.3 la tendencia de los valores del peso del producto, siendo para este caso el 34g el peso objetivo. Por lo que en la Figura 1.4 observamos las variaciones de los primeros meses, dando un promedio de 4.85%.

**Figura 1.3**

*Histograma de valores de peso del segundo producto*

**Figura 1.4**

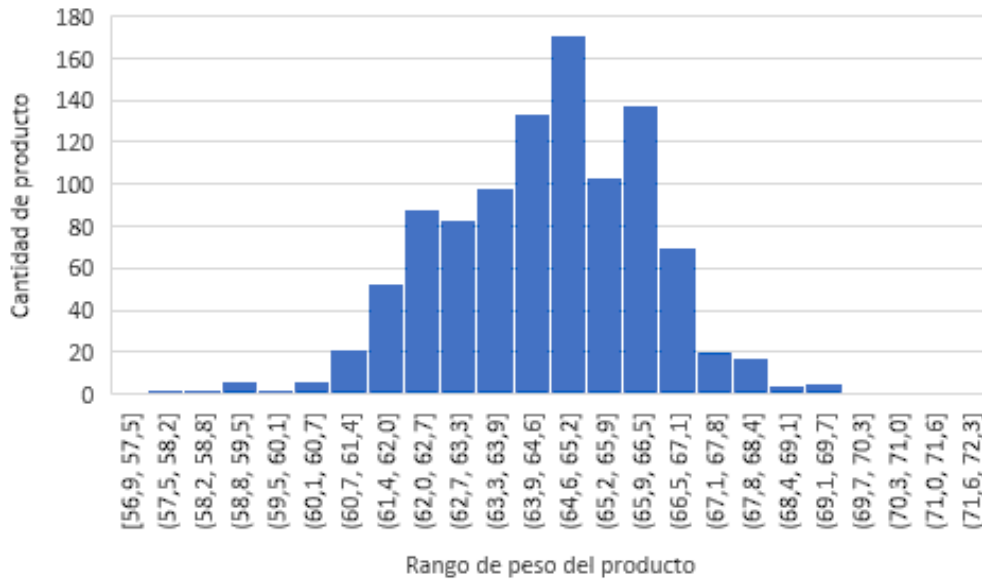
*Variación porcentual de pesos mensuales del segundo producto*



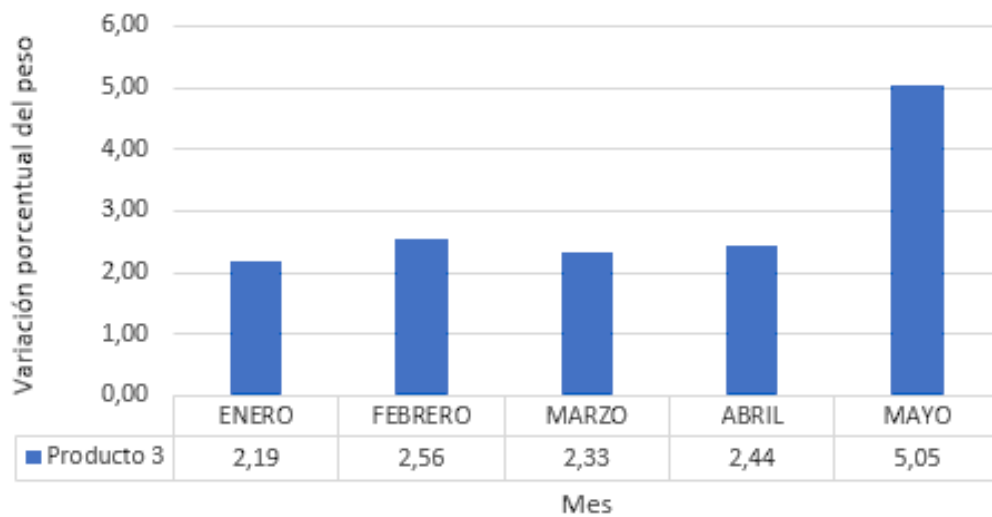
Para el ultimo producto se observa mediante la Figura 1.5 la tendencia de los valores del peso del producto, siendo para este caso el 66g el peso objetivo. Por lo que en la Figura 1.6 observamos las variaciones de los primeros meses, dando un promedio de 3.60%.

**Figura 1.5**

*Histograma de valores de peso del tercer producto*

**Figura 1.6**

*Variación porcentual de pesos mensuales del tercer producto*



Garantizar que los productos se entreguen dentro del rango de peso requerido es fundamental para reducir la cantidad de quejas relacionadas con no conformidades, lo que aumenta la satisfacción del cliente y preserva la reputación de la marca. Esta práctica de control de peso ideal también ayudará a optimizar el rendimiento de las materias primas utilizadas en el



proceso de producción, lo que resultará en un gran ahorro de costos y una mejora general de la eficiencia operativa.

Además, garantizar que el producto final cumpla con las especificaciones de calidad requeridas tiene un impacto directo en la fidelidad del cliente y la reputación de la empresa en el mercado. Esta mejora en la calidad y consistencia de los productos puede tener un efecto positivo en el negocio a largo plazo, fortaleciendo la posición de la empresa en el mercado y aumentando la demanda de sus productos.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Mejorar el sistema de control de pesos de producto para una divisora de bollería, mediante la migración de tecnología y optimización del sistema de control, aumentando la eficacia de la gestión del mantenimiento del equipo y usar la materia prima eficientemente durante la elaboración del producto.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

1. Mejorar el sistema de corte para optimizar el control de pesos en las bolas de masa extruidas por la divisora de bollería.
2. Migrar componentes del equipo a tecnología actualizada de Allen Bradley que es el estándar usado por el cliente en otros equipos de su planta.
3. Modelar el sistema para que tomando en cuenta las variables de entrada y salida escoger correctamente las constantes de operación del sistema de control existente en el equipo.
4. Desarrollar planos técnicos correspondientes a las mejoras aplicadas al equipo.

## 1.5 Marco teórico

En el Ecuador el consumo anual promedio de pan es de alrededor de 27 kg por persona, a diferencia de otros países de Latinoamérica los cuales tienen un promedio de 80 kg por persona. Es así como se observa que en el Ecuador la industria panificadora aún está en crecimiento [6].

Solo en el 2017, existían alrededor de 5670 empresas y negocios que se especializaban en la producción de productos de panadería, esto según el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). Las empresas de este sector llegaron a generar más de 300 millones de dólares al año, por consiguiente, también generó alrededor de 20 000 empleos de forma directa e indirecta, según representante de la Federación Nacional de Panificadores (Fenepan) [5]. A pesar de los sucesos que ocurrieron en los últimos años debido a la pandemia, el sector panificador siguió manteniendo sus ingresos anuales de 306 millones de dólares, además de generar 20 000 plazas de empleo directo [6].

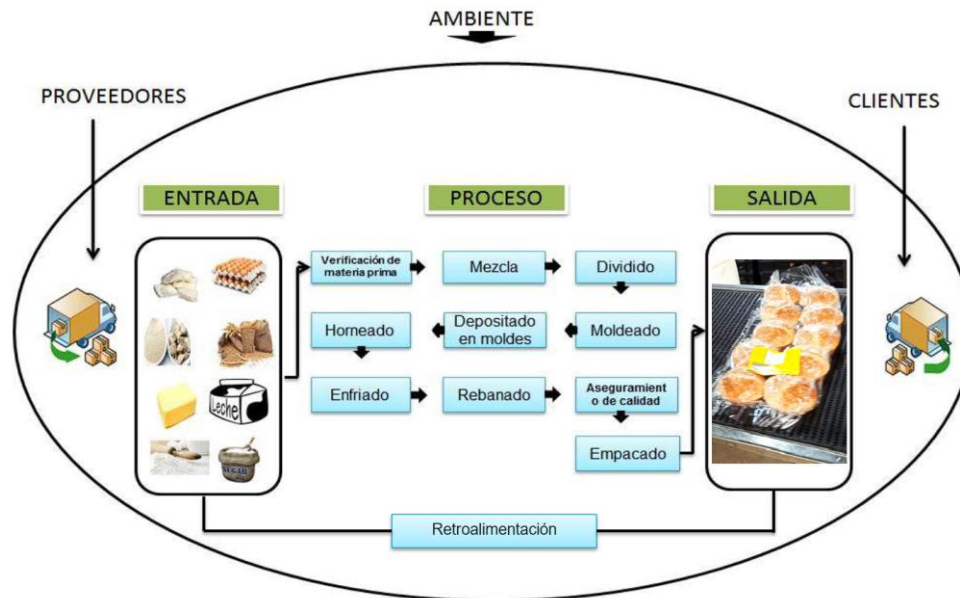
### 1.5.1 Proceso de producción

La producción de los diferentes productos de la línea de bollería y moldes dentro de la empresa panificadora se realiza en diferentes etapas, tal y como se muestra en la Figura 1.7. Primero se obtiene la materia prima de los diferentes proveedores de la empresa para después verificar que cumpla con los estándares de calidad establecidos. Una vez realizada la verificación, se dosifica la materia prima a la amasadora para empezar el proceso de mezclado y amasado de ingredientes, luego, mediante una banda transportadora pasa a la sección de división, el cual extruye y corta bolas de masa de cierto peso dependiendo del producto. Una vez que se tiene el producto cortado y según la forma que se requiera, es indexado en moldes específicos para así transportarlos a la cámara de fermentación donde a temperatura y humedad adecuadas el producto se hincha, luego en el horno obtienen la textura, color y sabor correspondientes. Una vez horneado el pan, en una máquina desmoldeadora se separa el producto de la lata y pasa a

enfriarse en una sección de transportadores en espiral temperatura ambiente, para poder ser empacado, sellado, puesto en gavetas y enviado a los diferentes puntos de venta.

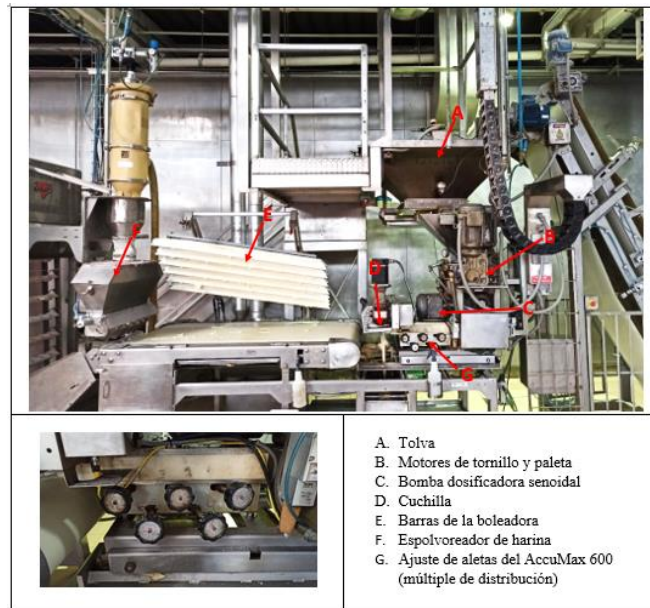
**Figura 1.7**

*Proceso de producción de pan [10]*



### 1.5.2 Funcionamiento de la etapa de corte y control de peso

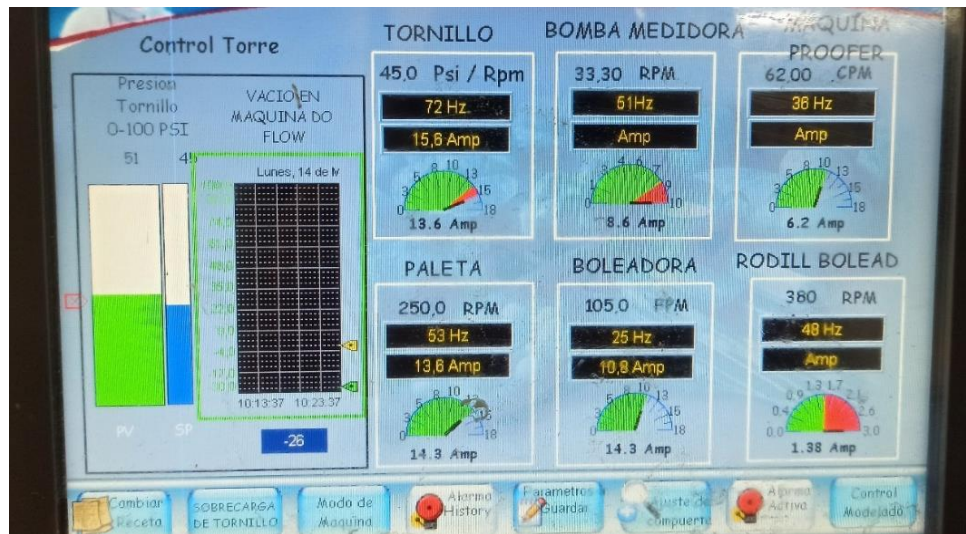
La sección divisora de bollería recibe masa por una banda transportadora desde la sección de amasado, la masa es almacenada en una tolva que una vez abierta su compuerta, con gravedad y generación de vacío dentro de la carcasa, se transporta la masa a la sección Do-Flow que contiene un tornillo sinfín y una paleta que contribuyen en el desarrollo de la masa y también la desgasifica para su posterior transporte hacia la bomba dosificadora o de masa que recibe la masa y la transporta al múltiple de distribución que divide la masa en 6 canales de flujo extruidos por boquillas, este flujo se corta a velocidad constante por una cuchilla comandada por un servomotor, según los cortes por minuto que se fija en la máquina los pedazos de masa caen sobre una banda boleadora, que como su nombre indica hace bolas de masa a medida que pasan por banda, estas bolitas de masa son pesadas por el operador para llevar un control de peso de las bolas de masa que están saliendo de la máquina.

**Figura 1.8***Etapa de corte y control de peso*

En la carcasa donde se encuentra el tornillo se encuentra un sensor de presión de diafragma que con una señal de 4-20 mA enviada al PLC se escala a un rango de 0-100 PSI. A partir de esta medición de presión se realiza el control PID del sistema donde intervienen la rotación del tornillo controlar la presión ejercida sobre la masa variando la velocidad en revoluciones por minuto del tornillo. El control de los actuadores tornillo, bomba medidora, cuchilla, paleta, boleadora y rodillo boleador se realiza de forma individual como se muestra en la Figura 1.9 de la pantalla de operación del equipo.

**Figura 1.9**

*Pantalla de operación de la divisora de bollería*



### 1.5.3 Estado del arte

Durante estos años se han redactado artículos y documentos que hablan sobre el beneficio, tanto económico como de calidad del producto, que trae la tecnología a las industrias. Uno de los artículos llamado “La innovación tecnológica en las empresas y su impacto positivo dentro del ecuador” redacta como empresarios optan por la actualización de sus equipos para poder tener beneficios al largo plazo. El artículo también menciona que, para obtener un mejor beneficio, este debe estar acompañado de las capacitaciones de sus empleados para que operen de manera correcta los equipos [2].

Adicionalmente, se encontró un documento titulado “Reducción del sobrepeso en masas procesadas por la máquina boleadora en la línea de panadería de la empresa paniqueso”. El documento analiza distintas alternativas para abordar el problema, entre las que se incluyen el mantenimiento de las máquinas boleadoras o su actualización, así como la capacitación de los operadores para un mejor control de los parámetros introducidos en la máquina. Estas soluciones son fundamentales para garantizar la calidad y consistencia del producto final. Este artículo no solo se limita a revisar trabajos previos, sino que también aporta valor al identificar las causas de

las variaciones de peso y proponer soluciones prácticas que podrían ayudar a reducir dichas variaciones en la producción de masas procesadas por la máquina boleadora en la línea de panadería de la empresa paniqueso [7].

Por último, otra posible solución, es la automatización del proceso de pesado del producto mediante los controladores de peso en red de Metter Toledo, las cuales rechazan el producto. El controlador en específico sería el “C33 PlusLine WD Controladora de bajo peso”, que se muestra en la Figura 1.10. Este permite interactuar con las fases anteriores y posteriores al proceso, funcionando de tal forma que, si el producto no llega a cumplir con los estándares establecidos, este sea enviando a otra sección, lo que ayudaría a reducir a minimizar las pérdidas de productos por bajos estándares de calidad [8] [9].

**Figura 1.10**

*Controladora de bajo peso C33 PlusLine WD [9]*



Se destaca la importancia de la innovación tecnológica, la capacitación de los empleados y la implementación de soluciones prácticas, como el mantenimiento, actualización y automatización, para abordar el desafío de reducir el sobrepeso en las masas procesadas por la

máquina boleadora en la línea de panadería de la empresa paniqueso. Estas acciones contribuirán a mejorar la calidad del producto y optimizar los procesos de producción.

## **Capítulo 2**



## 2.1 Metodología.

### 2.1.1 Selección de la alternativa de la solución

A partir de las investigaciones realizadas para resolver la problemática y cumplir de los requerimientos mencionados en el capítulo anterior, se formularon 3 alternativas:

- **Alternativa 1**

Repotenciación de la máquina divisora de bollería mediante la migración de tecnología del mecanismo de corte y la optimización de su actual sistema de control.

- **Alternativa 2**

Realizar una serie de capacitaciones a nivel técnico y operacional para que los operadores de la máquina divisora de bollería puedan realizar un mejor control del peso de las bolas de masa.

- **Alternativa 3**

Adquirir un equipo de la marca Metter Toledo o diseño de una máquina que realice la misma función, es decir no controle directamente el peso de las bolas de masa extruidas si no que rechace aquellas que tienen peso por debajo de las especificaciones de ese producto.

En la selección de la solución, se establecieron criterios que se utilizaron para evaluar cada una de las alternativas propuestas en este estudio. En la Tabla 2.1 se detallan estos criterios, incluyendo su peso relativo y nivel de importancia. A continuación, se ofrece una breve descripción de cada criterio de selección:

- **Precio:** Costo económico asociado con la adopción e implementación de la solución.
- **Efectividad:** Capacidad de la solución para lograr los objetivos y metas establecidos por la empresa.
- **Eficiencia:** Capacidad de la solución para realizar tareas o procesos de manera óptima y con el menor consumo de recursos posibles.
- **Autonomía:** Capacidad de la nueva solución para funcionar de manera independiente y automática en la medida de lo posible.

- **Facilidad de mantenimiento:** Capacidad de la tecnología migrada para ser reparada, actualizada o mantenida de manera sencilla y con bajos costos.
- **Durabilidad:** Resistencia y longevidad de la solución en el entorno industrial.
- **Implementación:** Proceso de incorporar la nueva tecnología migrada en el funcionamiento actual de la industria.

**Tabla 2.1.***Criterios de selección*

<b>CRITERIOS DE SELECCIÓN</b>			
<b>CRITERIO</b>	<b>Peso</b>	<b>% de Decisión</b>	<b>Rango de importancia</b>
<b>EFFECTIVIDAD</b>	7	26%	1
<b>IMPLEMENTACIÓN</b>	6	22%	2
<b>DURABILIDAD</b>	5	19%	3
<b>EFICIENCIA</b>	3	11%	4
<b>PRECIO</b>	3	11%	5
<b>FACILIDAD DE MANTENIMIENTO</b>	2	7%	6
<b>AUTONOMÍA</b>	1	4%	7
<b>TOTAL</b>	27	100%	

Luego de evaluar cada alternativa utilizando la matriz de decisión detallada en la tabla 2.2, se ha llegado a la conclusión de que la solución más factible para abordar la problemática planteada es la solución 1. Esta opción demuestra ser efectiva al corregir el problema mediante la migración de tecnología, y tiene la ventaja adicional de no requerir un gasto significativo para la empresa. Además, se destaca que esta solución tiene una perspectiva a largo plazo, lo que la convierte en una opción duradera.

**Tabla 2.2***Matriz de decisión de las soluciones*

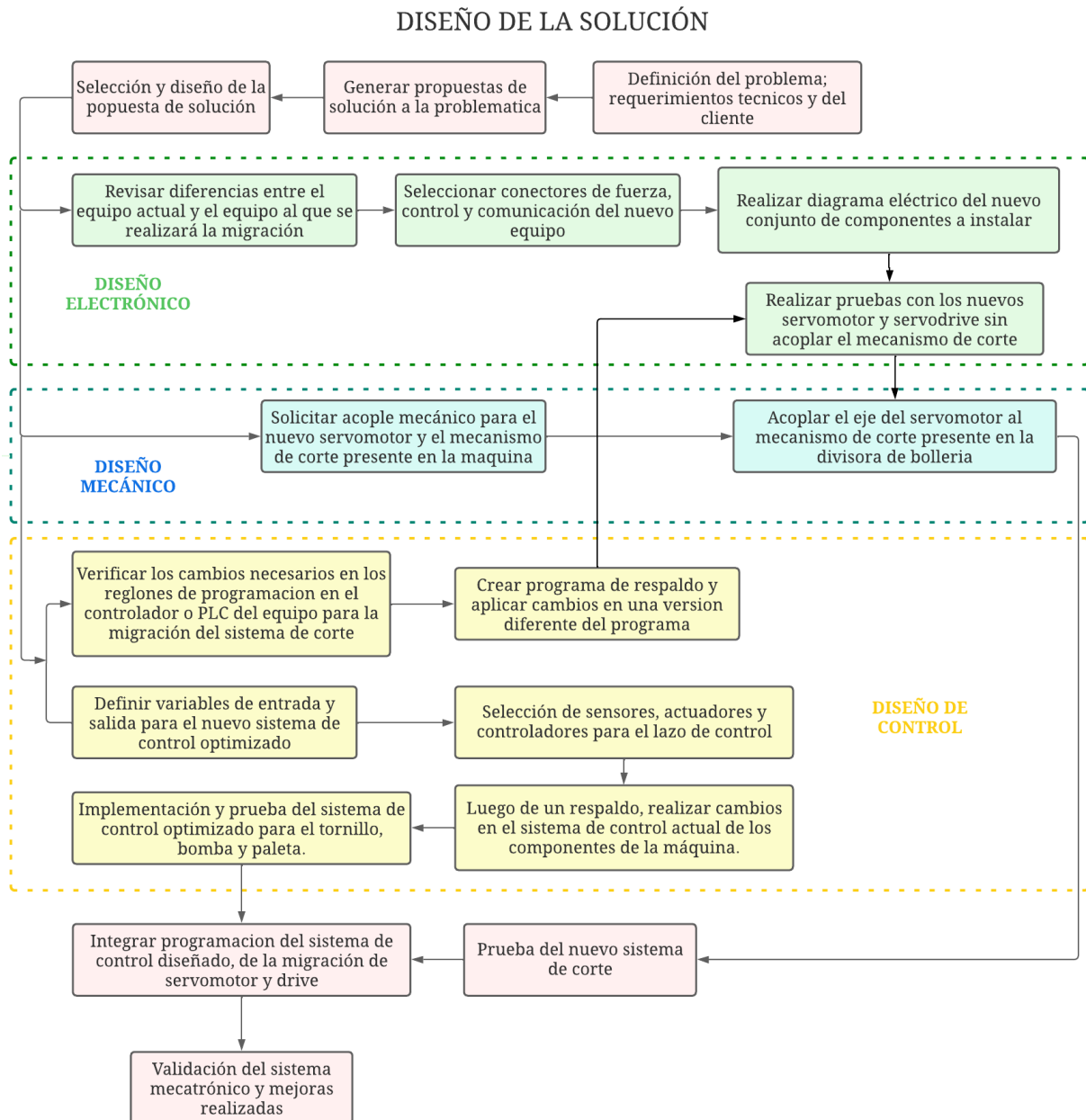
Soluciones	Criterios							Resultados	
	Precio	Efectividad	Eficiencia	Autonomía	Facilidad de mantenimiento	Durabilidad	Implementación	Puntaje	Prioridad
<b>Soluc. A</b>	0,044	0,104	0,044	0,015	0,044	0,074	0,133	0,459	1
<b>Soluc. B</b>	0,044	0,104	0,022	0,007	0,015	0,037	0,089	0,319	2
<b>Soluc. C</b>	0,022	0,052	0,067	0,015	0,030	0,074	0,044	0,304	3

## 2.2 Proceso de diseño

Después de haber seleccionado la solución a implementar, se procedió a diseñar el proceso para su desarrollo, teniendo en cuenta cada componente de la solución con el objetivo de cumplir con los requerimientos del cliente. En la Figura 2.1 se puede observar la metodología que se seguirá, representada mediante un diagrama de flujo que ilustra el proceso de diseño de la solución.

Figura 2.1

Metodología de diseño



Para el proceso de la solución escogida, se realizará el diseño de cada etapa de manera paralela, esto debido a que cada etapa se puede realizar de manera independiente. Una vez probadas y desarrolladas las etapas individuales del diseño electrónico, mecánico y de control, se integran para la validación del diseño mecatrónico final del sistema de extrusión y corte de la divisora de bollería para de ser necesario aplicar las mejoras que se requieran.

Como se puede observar la optimización del sistema de control actual se pretende realizar con los componentes técnicos con los que ya cuenta el equipo, realizando solo modificaciones en la programación del controlador existente en el tablero eléctrico de la divisora de bollería. Dicho lo anterior, se detallará con mayor precisión los cambios realizados en el sistema de corte de la máquina, objeto de estudio de este proyecto.

### 2.3 Requerimientos de diseño

En función a lo solicitado por el cliente, a continuación, en la tabla 2.3 se detallan los requerimientos de la solución.

**Tabla 2.3**

*Requerimientos del sistema*

<b><i>Requerimientos del sistema</i></b>	
<b>Funcionalidad</b>	Las mejoras aplicadas deben contribuir a un uso eficiente de la masa usada en la divisora de bollería.
<b>Maniobrabilidad</b>	Las mejoras aplicadas no deben entorpecer la operación de la máquina o en el mejor caso deben facilitar el uso de esta.
<b>Tiempo de instalación</b>	Las mejoras no deben inhabilitar la máquina es decir se deben aplicar por partes, durante los días que el equipo no se encuentra en producción o los días de mantenimiento del equipo.
<b>Tiempo de operación</b>	24 horas diarias, 5 días a la semana.

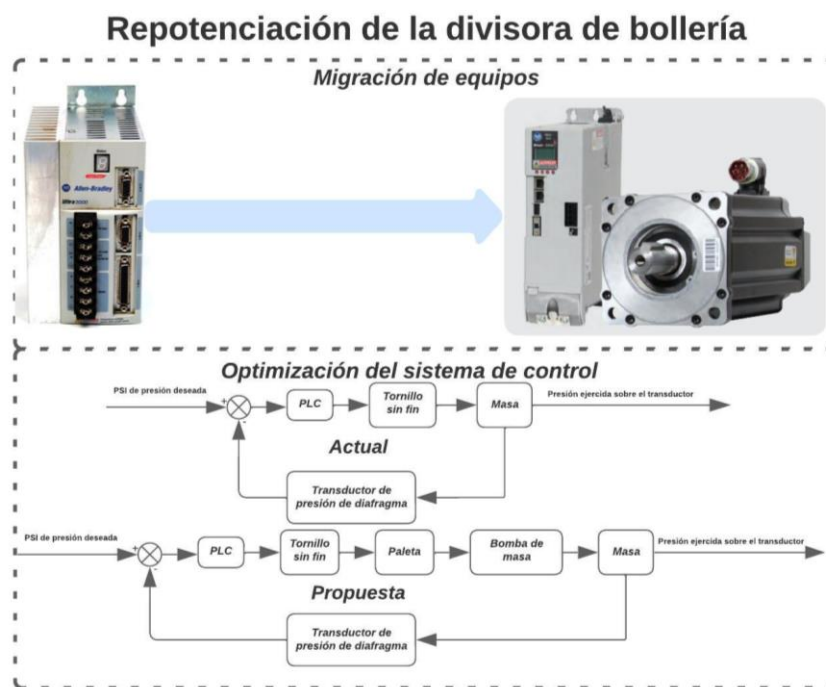
### 2.4 Diseño conceptual

En la Figura 2.2 se puede observar un boceto inicial sobre la migración de tecnología. Los componentes electrónicos del equipo no han sido cambiados desde el 2005, por lo que se requiere actualizar el equipo. Adicionalmente el sistema actual cuenta con un sistema de control de lazo cerrado, el cual hace uso del tornillo sin fin como actuador y la presión que ejerce la

masa sobre un transductor de presión como variable de control y retroalimentación de ese sistema de control. Por lo que se modificara el sistema de control en cual considere también a la paleta y bomba de masa como actuadores del sistema de control existente en la divisora de bollería.

**Figura 2.2**

*Diseño conceptual del sistema*



La repotenciación del mecanismo de corte de la divisora de bollería se realizará mediante la migración del servo drive ULTRA 3000 con número de catálogo 2098-DSD-020X y el servomotor N-5630-2-H00AA, que actualmente se usan en el tablero del equipo, a componentes actualizados que provee la marca Allen Bradley que es el estándar tecnológico utilizado en la empresa. El cliente ya cuenta con el servodrive Kinetix 5500 con número de catálogo

2198-H040-ERS y el servomotor VPL-A1303F-PJ12AA en su bodega de refacciones. El cambio de servodrive y servomotor del sistema de corte se acompañará de los cambios mecánicos, eléctricos y de programación necesarias para garantizar una repotenciación efectiva. Además, se tiene previsto optimizar el actual sistema de control de la máquina.

El sistema de control actual considera la presión que ejerce la masa sobre un sensor de presión de diafragma como retroalimentación de un lazo cerrado. De esta forma, el motor del tornillo ajusta de forma proporcional sus revoluciones por minuto para alcanzar el set point de presión deseado. Para mejorar este sistema de control, se tomarán en cuenta los parámetros de los actuadores que el operador controla de forma manual e individual: tornillo, paleta y bomba. Se optimizará de forma individual el control que posee cada uno de ellos, para el tornillo se encontrarán constantes más adecuadas para el sistema de control PID que ya se tiene en el equipo, para bomba de masa y paleta se realizará un autoajuste estático que permita afinar el control de velocidad que realiza el variador de frecuencia que comanda los motores de esta parte de la máquina, así se tiene un control más preciso de las variables del sistema ante perturbaciones que pueden generarse por las propiedades de la masa que varían según el producto o condiciones ambientales.

## **2.5 Diseño mecánico**

La integración del nuevo servomotor con el mecanismo del sistema de corte se realizará por un contratista externo, ya que dicho diseño no forma parte del alcance de este proyecto. Esta decisión permite concentrar el enfoque de este proyecto en la migración de los componentes de la marca Allen Bradley para que la repotenciación de la divisora de bollería se ejecute de forma exitosa.

## **2.6 Diseño eléctrico**

Figura 2.3

Alimentación de servomotores VPL según el manual de fabricante

Table 11 - Bulletin VPL Motor Cable Combinations

Motor Cat. No. (200V-class)	Feedback Type	Single Cable Cat. No. <sup>(1)</sup>
VPL-A063xx	Multi-turn or Single-turn Digital Encoder Feedback	2090-CSBM1DF-18AAxx or 2090-CSWM1DF-18AAxx (standard, non-flex) 2090-CSBM1DF-18AFxx (continuous-flex)
VPL-A0751E, VPL-A0752C, VPL-A0753C		
VPL-A0752E, VPL-A0753E		
VPL-A1001C		
VPL-A1001M, VPL-A1002x, VPL-A1003x		
VPL-A1152x, VPL-A1153x		
VPL-A1303x, VPL-A1304x, VPL-A1306x	2090-CSBM1DF-14AAxx or 2090-CSWM1DF-14AAxx (standard, non-flex) 2090-CSBM1DF-14AFxx (continuous-flex)	

Según el manual del fabricante, el servomotor que se va a usar opera con una entrada trifásica de 220 voltios, lo cual coincide con el voltaje de alimentación del tablero principal de la máquina divisora de bollería. [11]

Figura 2.4

Conexión de servodrive y servomotores actuales

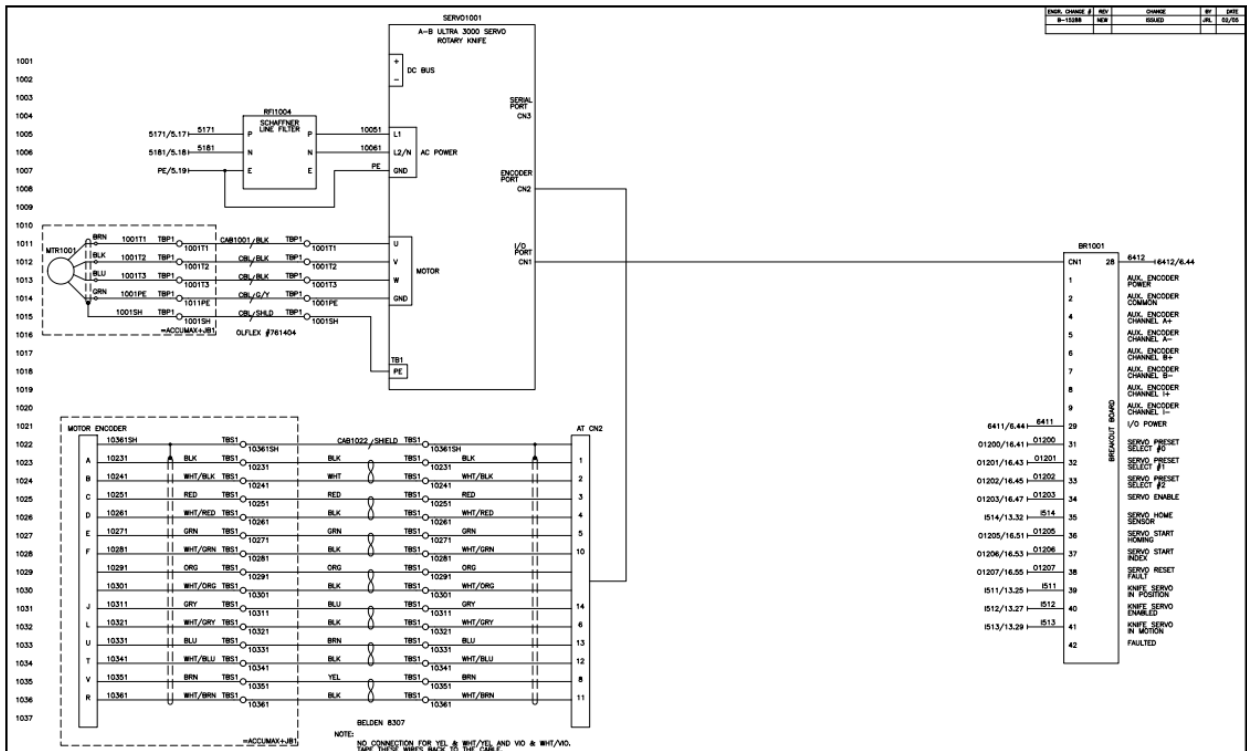
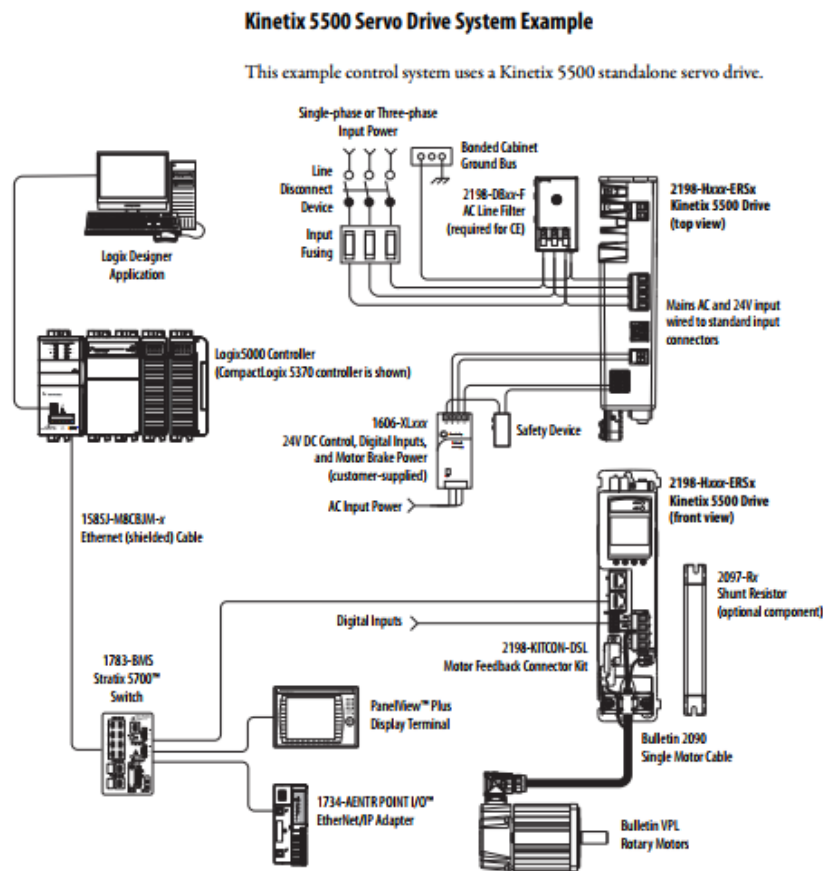






Figura 2.6

Esquema eléctrico de conexión para servodrive y servomotor a usar en la migración.



El manual del fabricante del Servodrive Kinetix 5550 y Servomotor VPL-A1303F-PJ12AA recomienda una conexión específica para el equipo, según se muestra en el esquema eléctrico de la Figura 2.6. En dicho esquema, destacan el uso de componentes como PLC o controlador del sistema, un filtro de línea alterna, una fuente de 24VDC, una switch administrable 5700, sin embargo, en lugar de usar un switch, se puede aprovechar uno de los puertos ethernet del PLC para establecer la comunicación con el servodrive, lo que simplifica la configuración de la red.

De acuerdo con los componentes con los que cuenta el cliente la tabla 2.4 se organizan los principales componentes que integrarán la migración servodrive y servomotor, donde se explica de forma breve su función en el sistema, se visualiza el uso de 2 controladores, cuyo porque será explicada en la sección controlador del sistema del presente documento. [13]

Tabla 2.4

*Lista de componentes eléctricos implicados en la migración*

Imagen	Componente	Función
	PLC SLC 5/05	El PLC actual del equipo el cual cuenta con la lógica de programación de todos los componentes de la divisora de bollería.
	PLC ControlLogix5575	Tendrá la lógica de programación para poder controlar al kinet 5500 para mover al servomotor.
	Servodrive Kinetix 5550	Servodrive encargado del control de movimiento del servomotor.
	Servomotor VPL-A1303F- PJ12AA	El servomotor transmitirá su movimiento al mecanismo de corte por cuchilla de la máquina.
	Switch Stratix 2000	La comunicación de estos equipos se maneja vía Ethernet/IP por lo que este dispositivo permitirá interconectar los equipos en la red.



Filtro de línea  
alterna

Disminuye el ruido eléctrico en la entrada de voltaje al equipo, dando así un mejor funcionamiento



Fuente de 24VDC

Alimentación de la parte de control de los diferentes componentes del equipo.

## 2.7 Sistema de Control

Para mejorar el sistema de control actual que maneja la presión que ejerce el tornillo se analizará los datos cada vez que el operador modifique parámetros en el panel de operación de la divisora de bollería para ajustar la máquina y lograr que las bolas de masa cumplan con el peso requerido. Posteriormente, se implementará un sistema de control que optimice el uso de los parámetros de los actuadores: paleta y bomba de masa.

### 2.7.1 Parámetros de monitoreo y control

Para este proyecto, se requiere monitorear en la divisora de bollería los parámetros de Tornillo sin fin, paleta y bomba de masa. Como ya se ha mencionado, el tornillo sin fin controla la presión ejercida de la masa sobre un transductor de presión. En combinación con un control más preciso de los otros dos parámetros de manera independiente, se obtendrá un flujo volumétrico constante de la masa por la estructura de la máquina hacia los puertos del múltiple de distribución, donde por cuchilla se cortan los diferentes segmentos de masa, para así tener una regulación con mayor exactitud del peso de las bolas de masa producidas por la máquina.

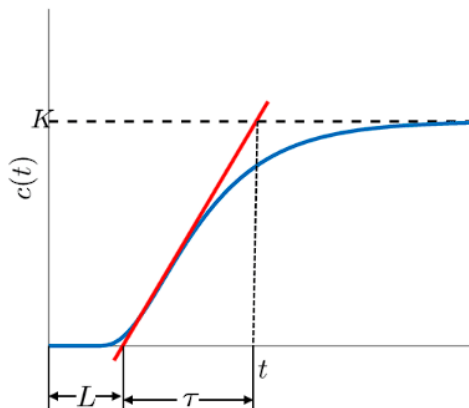
Dado que no se cuenta con un modelo matemático de la planta, se optará por usar uno de los métodos de sintonización Ziegler y Nichols de lazo abierto o lazo cerrado.

Para el primer método de lazo abierto se debe colocar el controlador en modo manual para así generar una entrada de tipo escalón en la salida del controlador PID hasta obtener un comportamiento en la salida del tipo sigmoïdal o forma de S. En caso de que la salida presente impulsos en lazo abierto o posea una dinámica integradora con crecimiento constante en el tiempo, no se podrá usar el primer método.

Una vez obtenida la gráfica de la salida en respuesta a una entrada escalón, se obtienen los diferentes parámetros tal y como se muestra en la Figura 2.7. Obteniendo así el retardo  $L$  y la constante de tiempo  $\tau$  a partir de la tangente en el punto de inflexión y su intersección en el eje del tiempo y punto máximo de la curva  $K$ . [14]

**Figura 2.7**

*Obtención de parámetros en la curva sigmoïdal*



Finalmente, a partir de los parámetros obtenidos, se procede a calcular las respectivas constantes del controlador PID a partir de los ajustes mostrados en la Figura 2.8.

**Figura 2.8***Contantes de Ziegler y Nichols – Método 1*

Controlador	$K_p$	$\tau_i$	$\tau_d$
<b>P</b>	$\frac{\tau}{KL}$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0.9 \frac{\tau}{KL}$	$\frac{L}{0.3}$	0
<b>PID</b>	$1.2 \frac{\tau}{KL}$	$2L$	$0.5L$

Para el segundo método de lazo cerrado se aumenta experimentalmente la ganancia proporcional del controlador, hasta obtener en la salida una respuesta oscilatoria con amplitud constante. Así, el valor K con el que se obtuvo la respuesta deseada, sería nuestra ganancia Crítica  $K_w$ , dando como resultado la fórmula 1. Así mismo a partir del gráfico se obtiene la frecuencia crítica  $P_{cr}$  a partir de la fórmula 2.

$$K_w = K \quad [1]$$

$$P_u = 2\pi/w_u \quad [2]$$

Una vez obtenido los dos parámetros se procede a calcular las contantes del controlador a partir de los ajustes mostrados en la Figura 2.9.

**Figura 2.9***Contantes de Ziegler y Nichols – Método 2*

Controlador	$K_p$	$\tau_i$	$\tau_d$
<b>P</b>	$0.5K_u$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0.45K_u$	$\frac{1}{1.2}P_u$	0
<b>PID</b>	$0.6K_u$	$0.5P_u$	$0.125P_u$

Finalmente se remplazan las constantes calculadas en la ecuación de controlador PID de la fórmula 3.

$$G_c(s) = K_p(1 + \tau_i s + \tau_d s) \quad [3]$$

### 2.7.2 Controlador del sistema

El controlador actual de la máquina divisora de bollería es un programador lógico controlable PLC SLC 5/05 que se instala en un chasis de 13 slots y cuenta con fuente de alimentación y módulos de entrada y salida según la tabla 5. De acuerdo con la sección de diseño eléctrico entradas y salidas digitales del servodrive de la cuchilla actual están conectadas al módulo 5 de entradas digitales 1746-IB16, y módulo 7 de salidas digitales, según se mostró en la Figura 2.5. Este controlador está discontinuado y se programa mediante el software RSLogix 500. Este controlador no es compatible con los nuevos componentes a los que se desea migrar la tecnología del sistema de corte de la máquina por lo que se debería migrar también el controlador del equipo o buscar una alternativa para poder migrar solo la electrónica del sistema de corte.

**Tabla 2.5**

*Controlador PLC SLC 5/05*

N. catálogo	PLC SLC 5/05
001 1746-A13	1746 chasis de 13 slots
001 1746-P4	Fuente de alimentación - 120/240V AC - 10 A
001 1747-L553	Controlador SLC 5/05
004 1746-IB16	Módulo de 16 entradas DC de respuesta rápida - Sink 24V DC
001 1746sc-INI4vi	Módulo de 4 Entradas analógicas aisladas (V/C)
002 1746sc-INO4vi	Módulo de 4 Salidas analógicas aisladas (V/C)
001 1746-NI8	Módulo de 8 entradas analógicas
004 1746-OB16	Módulo de salidas DC tipo relay - 10-50V DC

Actualmente, se llevan diversos proyectos de migración en la planta y el PLC SLC 5/05 de este equipo de comunica con un PLC ControlLogix 5575 del tablero de otro equipo, en el cuál se realizará la programación encargada de la parte de control de movimiento en la que participan el servodrive y servomotor a los que se realizará la migración. El PLC ControlLogix 5575 que se

instala en un chasis de 4 slots, cuenta con fuente de alimentación, 1 módulo de entrada y salidas digitales, además de un módulo de red según la tabla 6.

**Tabla 2.6**

*Controlador Logix5575*

<b>N. catálogo</b>	<b>PLC ControlLogix</b>
<b>001</b> 1756-A4	Chasis de 4 slots
<b>001</b> 1756-PA72	Fuente de alimentación 85-265 VAC con salida 5V-10 A
<b>001</b> 1756-L75	Controlador Logix5575
<b>001</b> 1756-EN2TP	Módulo Bridge EtherNet 10-100M
<b>001</b> 1756-OB16I	Módulo de 16 salidas digitales 10-30 VDC
<b>001</b> 1756-IB16	Módulo de 16 entradas digitales 10-30 VDC

### **2.7.3 Arquitectura de control**

El servodrive ULTRA 3000 usa el protocolo de comunicación IEC 61491 SERCOS, Serial Real-Time Communication, que usa la fibra óptica como medio para el enlace con el controlador del sistema. Por otro lado, el servodrive Kinetix 5500 se comunica por red EtherNet/IP, lo que le brinda mayor escalabilidad respecto a futuras actualizaciones y cambios en el equipo. El servodrive ULTRA 3000 existente en planta se controla por entradas y salidas digitales, este tiene asignado la función de sus entradas y salidas digitales, su configuración de movimiento mediante el software Ultraware, por lo que la programación en el PID usa esa configuración ya existente para poner en funcionamiento al equipo. [13]



**Figura 2.10.**

*Switches administrables con CIP Sync*

Ethernet Switch Selection

Type of Switch: Additional - Managed

Switching / Management

- Layer 3 Routing
- CIP Sync (IEEE 1588)
- MSTP
- EtherChannels
- Quality of Service (QoS)
- PRP RedBox Capable
- Deep Packet Inspection
- Active/Standby Links
- Resilient Ring Protocol (REP)
- Flex Links
- Access Control Lists (Security)
- Static / InterVLAN Routing
- NAT
- VPN
- Internet Sharing

Hardware

- Direct DLR
- On Machine
- Conformal Coating
- Power over Ethernet (PoE)

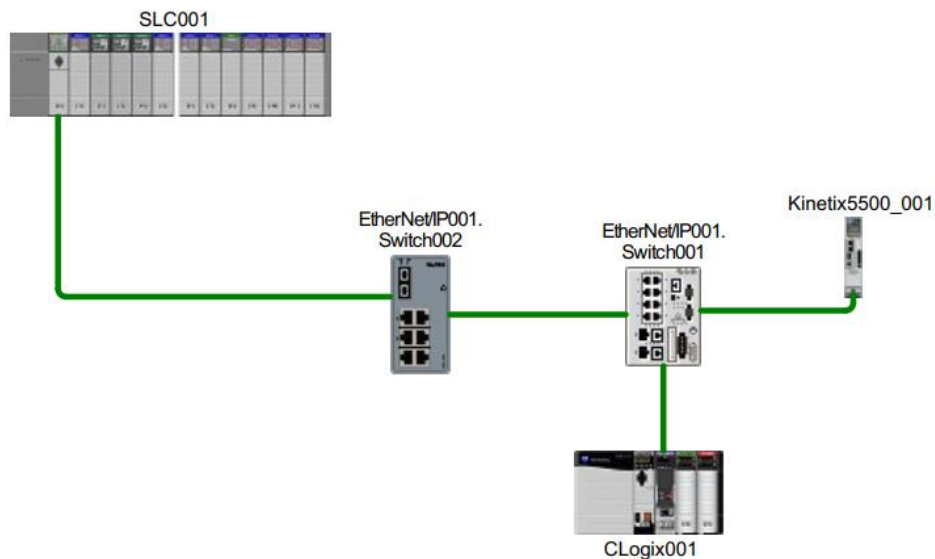
Catalog Number	Total Ports	Copper Ports	Fiber Ports	Combo Ports	SFP Ports	PoE Ports	CIP Sync	MSTP	REP	Ether Chans	Flex Links	QoS	Layer 3	VLAN Routing	ACL	NAT	Direct DLR	IP67	Conf Coat
<b>Stratix 5410</b>																			
1783-IMS28GNAC	28	12	0	0	16	12	X	X	X	X	X	X		X		X			
1783-IMS28GNDC	28	12	0	0	16	12	X	X	X	X	X	X		X		X			
1783-IMS28GRAC	28	12	0	0	16	12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
1783-IMS28GRDC	28	12	0	0	16	12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
1783-IMS28NAC	28	12	0	0	16	12	X	X	X	X	X	X		X		X			
1783-IMS28NDC	28	12	0	0	16	12	X	X	X	X	X	X		X		X			
1783-IMS28RAC	28	12	0	0	16	12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
1783-IMS28RDC	28	12	0	0	16	12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
<b>Stratix 5700</b>																			
1783-BMS10CGN	10	8	0	2	0		X	X	X	X	X	X		X	X	X	1		

El switch debe tener CIP Sync, que permite la comunicación entre equipos de motion.

Este tipo de switch se conocen como switch administrable ya que a cada puerto se le asigna una dirección IP estática.

**Figura 2.11**

*Topología de red del proyecto*



Los dispositivos son conectados usando topología estrella, donde cada dispositivo está conectado al switch administrable Stratix 5700 como se muestra en la Figura 2.11.

## **Capítulo 3**

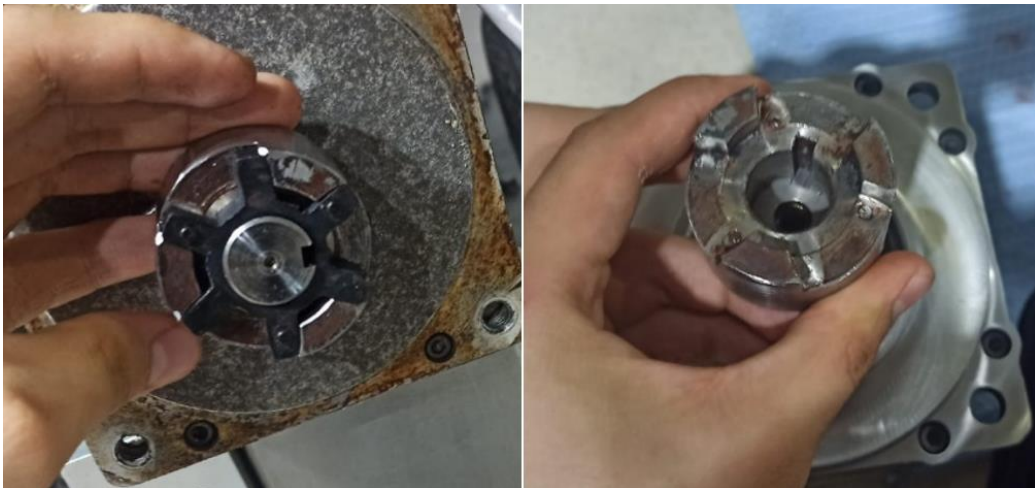
## 3.1 Resultados

### 3.1.1 Diseño mecánico

Para poder adaptar el nuevo servomotor se realizaron modificaciones mecánicas, debido a que el eje del servomotor original y el nuevo no tienen dimensiones iguales, es decir que el acople que usa sistema original para transmitir el movimiento del eje al mecanismo de corte debe ser diferente para el nuevo servomotor.

**Figura 3.1**

*Acople mecánico en el eje del servomotor original y en el nuevo*

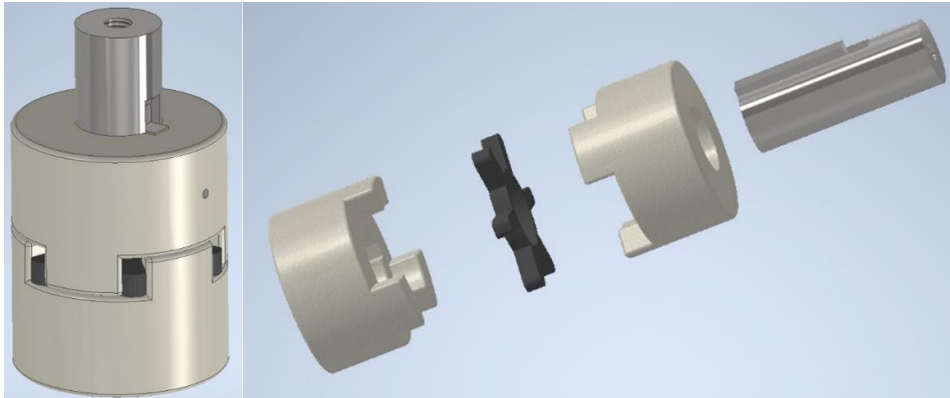


Como se puede observar en la Figura 3.1 la parte del acople tipo araña que encaja en el eje del nuevo servomotor no cuenta con las dimensiones suficientes para que se pueda ubicar el eje dentro de él, por lo que sus dimensiones deben ser mayores para poder ajustarse al nuevo eje, por lo que se diseña y fabrica un acople tipo araña que cumpla con estos requerimientos.

Adicionalmente se realizó un diseño 3D del acople tipo araña en inventor tal y como se muestra en la Figura 3.2, en donde se puede apreciar de mejor forma el ensamblaje del acople y el eje de transmisión.

**Figura 3.2**

*Diseño 3D del acople tipo araña*

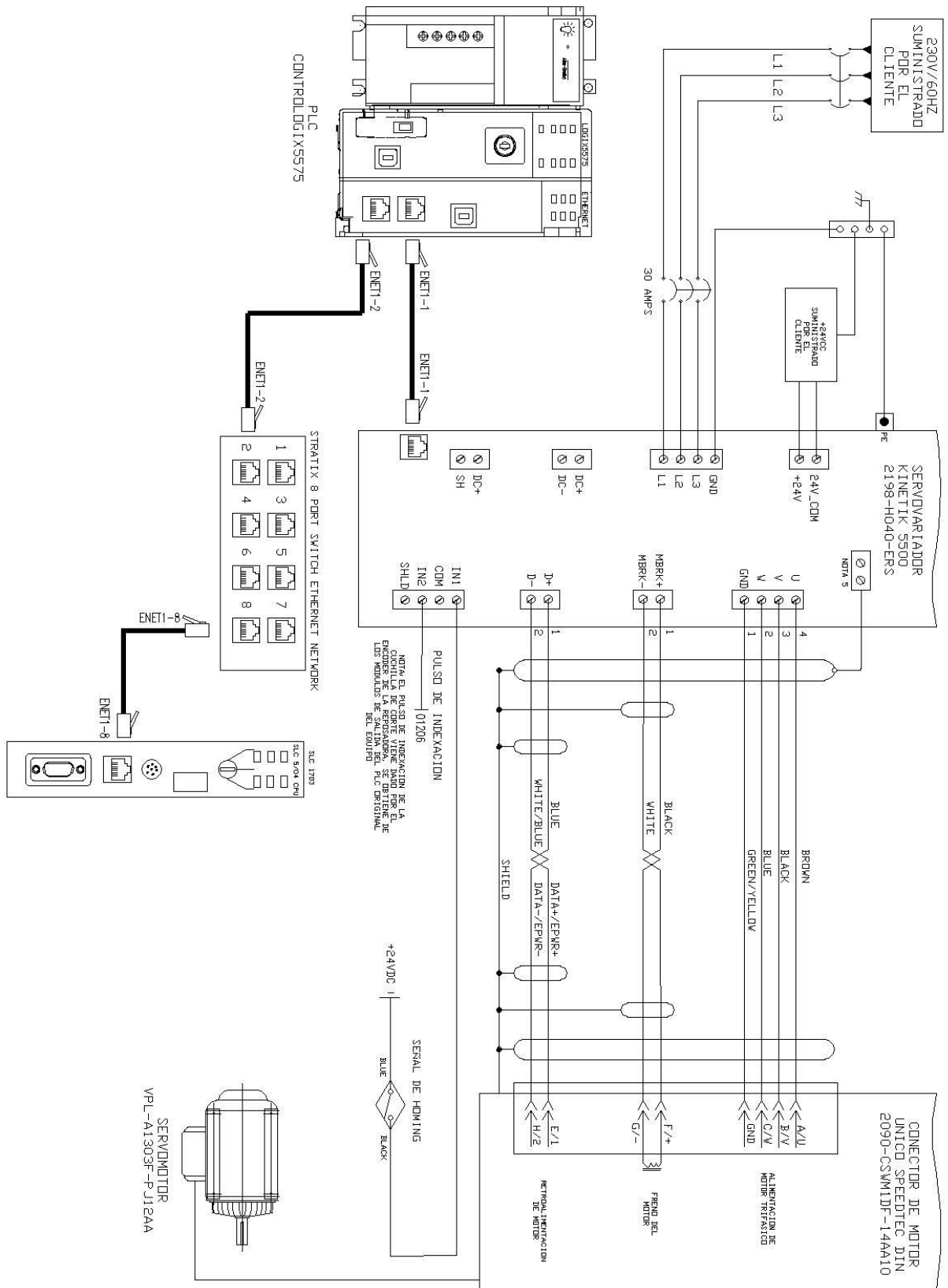


### **3.1.2 Diseño eléctrico**

En la Figura 3.3 se muestra el diagrama eléctrico de las conexiones que se realizó para integrar el servodrive Kinetix 5500 con número de catálogo 2198-H040-ERS y el servomotor VPL-A1303F-PJ12AA. EL diagrama eléctrico toma en cuenta componentes ya operativos en planta como el PLC SLC 5/05 que comanda a la divisora de bollería, la alimentación del tablero principal de esta máquina, el pulso de indexación O1206 que se toma del módulo 12, salida digital 6 del PLC SLC 5/05 y el switch de ethernet.

Figura 3.3

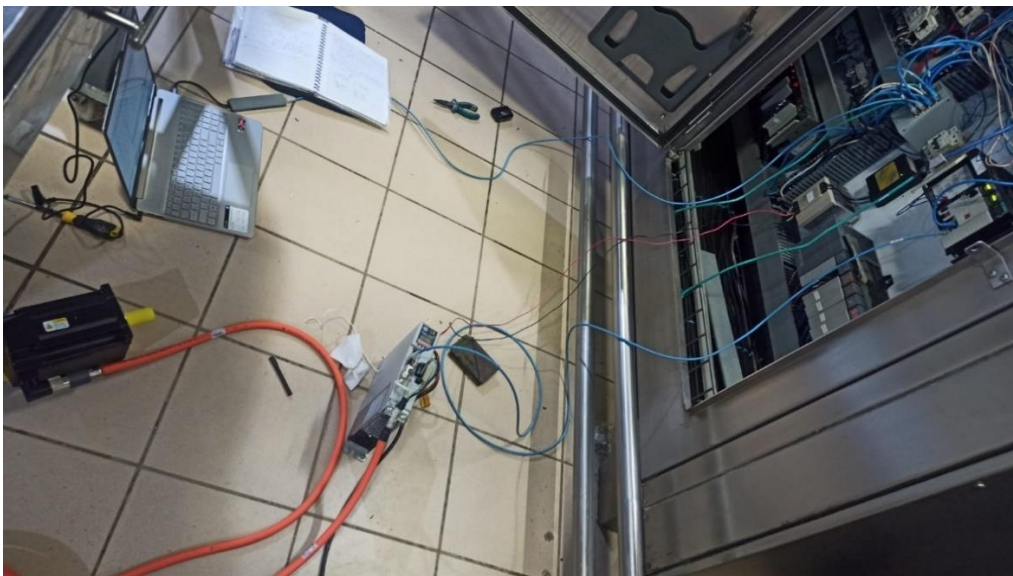
Diagrama eléctrico



Siguiendo las conexiones del diagrama eléctrico realizado se procedió a añadir los componentes de la migración tecnológica, tema de estudio de este proyecto integrador. La idea inicial era transmitir los datos de las señales físicas vía ethernet, comunicando el PLC que contiene la programación del drive del servomotor usado para la migración del equipo con el PLC original del equipo, pero la sincronización no era óptima, ocasionaba que se pierdan pulsos de indexación, por lo que el mecanismo de corte no realizaba los cortes por minuto seleccionados en los parámetros de operación del equipo. Se decidió usar las 2 entradas digitales del drive kinetix 5500, IN1 para la señal de homing del equipo y para recibir el pulso de indexación IN2, con lo que se logra obtener los cortes por minuto del mecanismo de corte, de acuerdo con lo ingresado en los parámetros del panel de operación de la máquina.

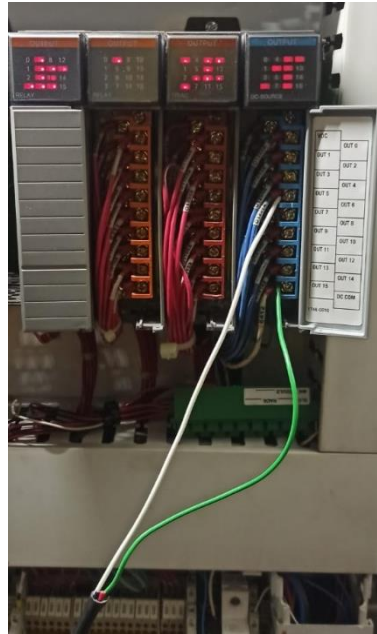
**Figura 3.4**

*Conexión del Kinetix 5500 y servomotor VPL*



**Figura 3.5**

*Conexión realizada para obtener la señal de indexación*



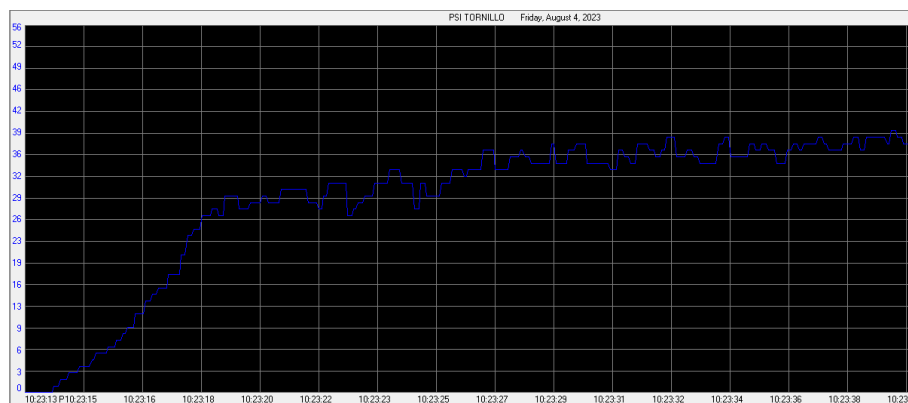
### 3.1.3 Sistema de control

#### 3.1.3.1 Parámetros del control PID del tornillo.

Para la obtención de los parámetros del controlador PID se usó el primer método de lazo abierto de Ziegler y Nichols. Para ello se recopilaban los datos de la sección de tornillo poniendo el controlador en modo manual para así generar una entrada de tipo escalón. A continuación, se obtuvo una salida de tipo sigmoïdal tal como se muestra en la Figura 3.6.

**Figura 3.6**

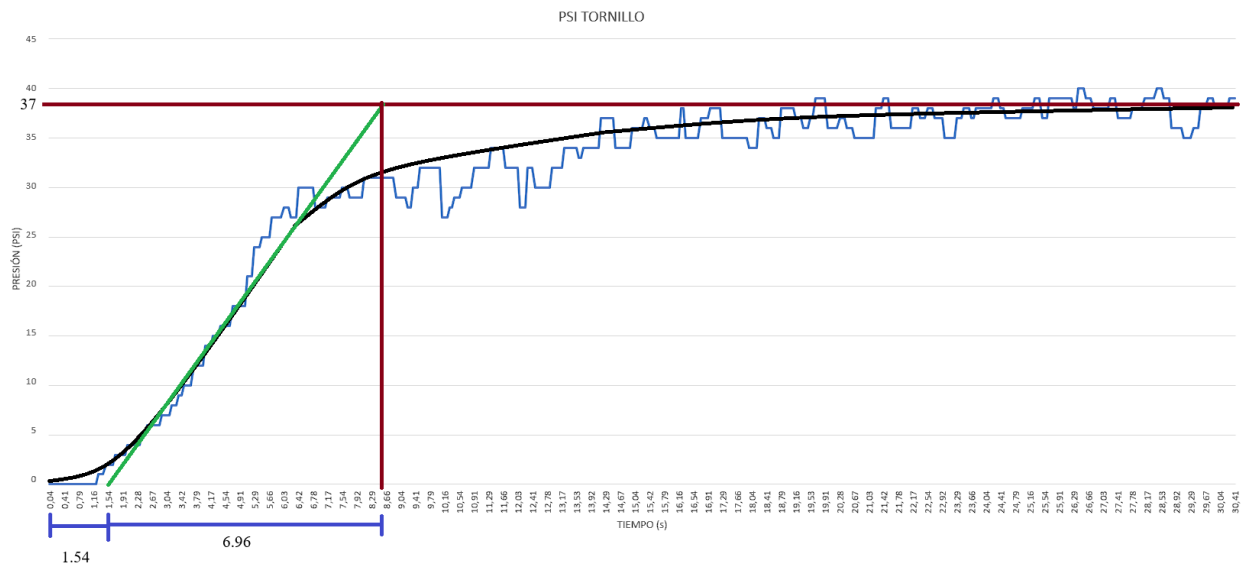
*Gráfica de la salida del sistema con una entrada de tipo escalón*



A partir de los datos generados, se realizó una gráfica en la cual se trazaron las diferentes líneas para obtener los parámetros de retardo, constante de tiempo y sus intersecciones a partir de una tangente en el punto de inflexión de la gráfica. A continuación, se obtuvieron los diferentes parámetros del método de Ziegler y Nichols, tal y como se muestra en la Figura 3.7.

**Figura 3.7**

*Obtención de los parámetros del primer método de Ziegler y Nichols*



Mediante los parámetros obtenidos, se calculó las diferentes constantes para el controlador PID a partir de las fórmulas de la Figura 2.9. Dando como resultados las constantes del controlador PID que se muestran en la tabla 3.1

**Tabla 3.1**

*Parámetros del controlador PID*

Controlador	$K_p$	$\tau_i$	$\tau_d$
PID	0.15	3	0.75

A partir de las constantes del controlador PID obtenidas anteriormente, se procedió a reemplazar los valores por defectos en el equipo, los cuales tenían un valor de 10, 1, 0 para las constantes proporcional, integral y derivativa respectivamente como se muestra en la Figura 3.8.



**Figura 3.8**

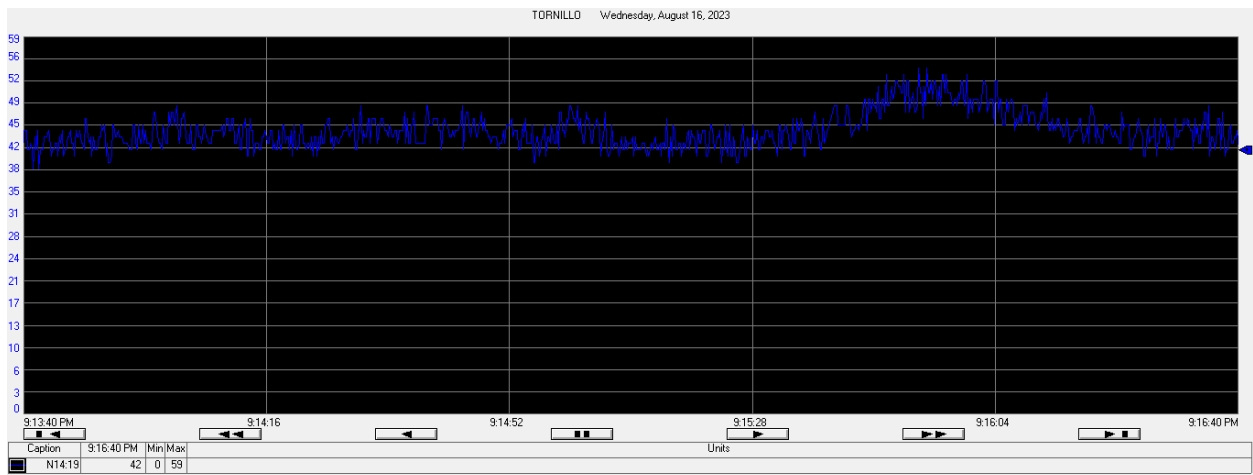
*Constantes usadas por defecto para el control PID del tornillo*



Para un set point de 45 PSI se tomaron lecturas del transductor de presión de diafragma durante un lapso de 3 minutos, obteniendo una gráfica como se muestra en la Figura 3.9, donde se aprecia mucha variabilidad y poca estabilidad alrededor del set point, sin tomar en cuenta el ruido o perturbaciones presentes en el sistema de control.

**Figura 3.9**

*Señal de presión obtenida con las constantes por defecto de la máquina*



Se revisó el programa para verificar como se usaban las constantes ingresadas por pantalla y se tiene que la constante proporcional se multiplica por 1, la constante integral por 0.1 y la constante derivativa por 0.01. Se modificaron las constantes directamente en el bloque PID del programa, los más cercano posible a lo obtenido teóricamente usando el primer método de Ziegler y Nichols como se muestra en la Figura 3.10.

**Figura 3.10**

*Primera modificación de constantes usando Ziegler Nichols*

The screenshot shows a 'PID Setup' dialog box with the following fields:

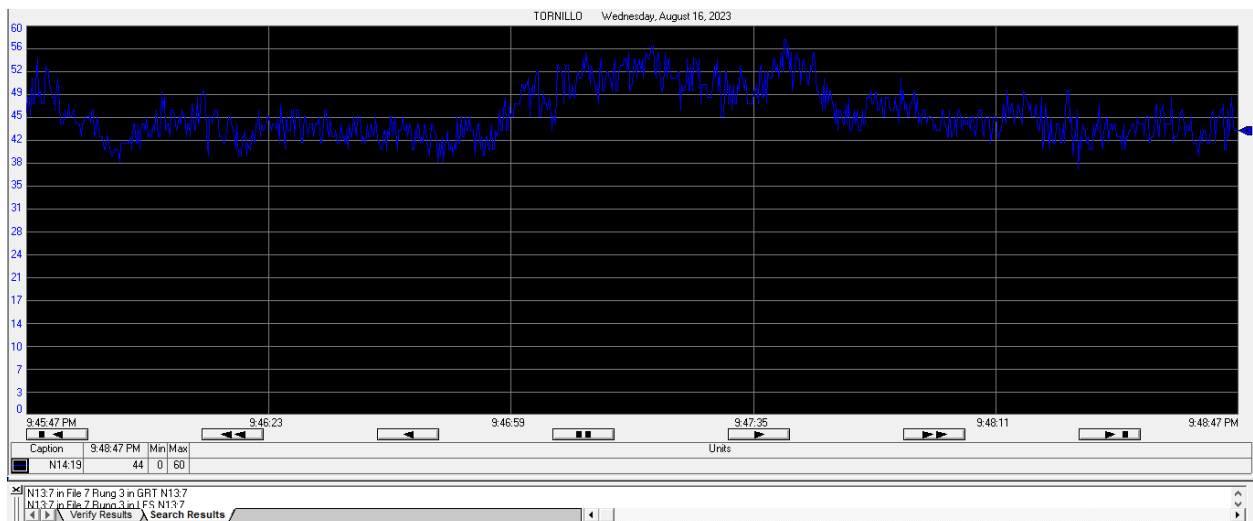
- Tuning Parameters:**
  - Controller Gain Kc = 0.2
  - Reset Ti = 0.3
  - Rate Td = 0.75
  - Loop Update = 0.02
  - Control Mode = E=SP-PV
  - PID Control = AUTO
  - Time Mode = TIMED
  - Limit Output CV = NO
  - Deadband = 0
  - Feed Forward Bias = 0
- Inputs:**
  - Setpoint SP = 7373
  - Setpoint MAX(Smax) = 0
  - Setpoint MIN(Smin) = 0
  - Process Variable PV = 7452
- Output:**
  - Control Output CV (%) = 76
  - Output Max CV (%) = 0
  - Output Min CV (%) = 0
  - Scaled Error SE = -79
- Flags:**
  - TM = 1
  - AM = 0
  - CM = 0
  - QL = 0
  - RG = 0
  - SC = 1
  - TF = 0
  - DA = 0
  - DB = 0
  - UL = 1
  - LL = 0
  - SP = 0
  - PV = 0
  - DN = 1
  - RA = 0
  - EN = 1

Buttons: OK, Cancel, Help

No se obtiene una mejor respuesta, como se visualiza en la Figura 3.11, la señal de presión aún presenta mucha variabilidad con respecto al set point de 45 PSI ingresado.

**Figura 3.11**

*Señal obtenida luego de aplicar Ziegler y Nichols*



Modificando las constantes halladas usando el primer método de Ziegler Nichols, aumentando la constante proporcional para disminuir la diferencia entre el estado deseado y el estado conseguido, disminuyendo la constante integral para que la respuesta se ajuste con mayor

velocidad al set point del equipo sin causar inestabilidad en el sistema. Por último, se aumenta la magnitud de la constante derivativa para alcanzar una estabilidad en la respuesta.

**Figura 3.12**

*Constantes corregidas para el control PID del tornillo*

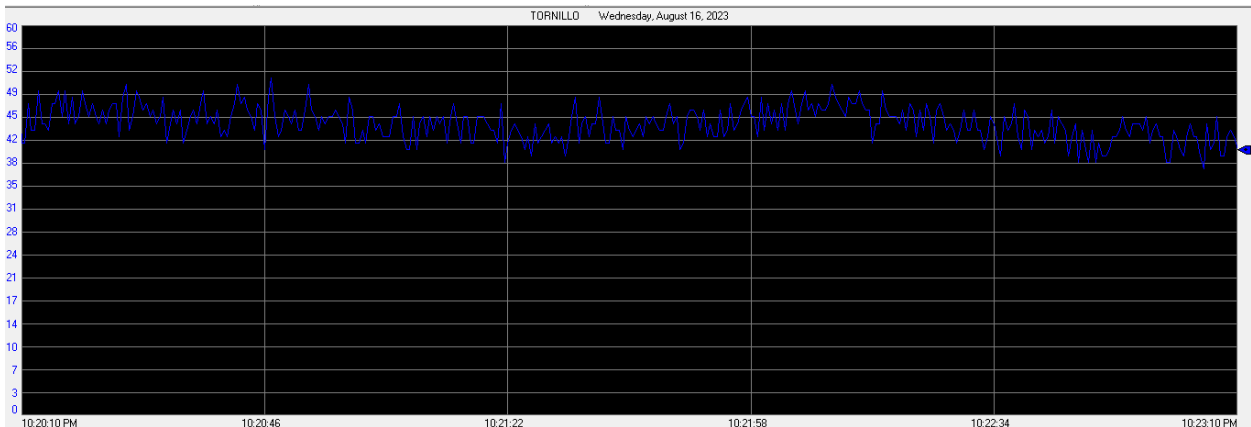
The screenshot shows a 'PID Setup' dialog box with the following fields and values:

Section	Parameter	Value
Tuning Parameters	Controller Gain Kc	1.3
	Reset Ti	0.2
	Rate Td	0.90
	Loop Update	0.02
	Control Mode	E=SP-PV
	PID Control	AUTO
	Time Mode	TIMED
	Limit Output CV	NO
Inputs	Setpoint SP	7373
	Setpoint MAX(Smax)	0
	Setpoint MIN(Smin)	0
	Process Variable PV	6652
	Control Output CV (%)	100
Output	Output Max CV (%)	95
	Output Min CV (%)	0
Flags	Scaled Error SE	721
	TM	1
	AM	0
	CM	0
	OL	0
	RG	0
	SC	1
	TF	0
	DA	0
	DB	0
UL	1	
LL	0	
SP	0	
PV	0	
DN	1	
RA	0	
EN	1	

Con las constantes halladas se obtiene una respuesta como se muestra en la Figura 3.13, donde se observa que existe menor variabilidad y una mayor estabilidad cerca del set point, sin tomar en cuenta las perturbaciones del sistema y el ruido propio de las lecturas del sensor, por lo que se puede decir que se han hallado mejores constantes para el control PID del tornillo.

**Figura 3.13**

*Señal obtenida con las constantes corregidas del método de Ziegler y Nichols*



### 3.1.3.2 Optimización del control en paleta y bomba de masa


Para el control de los motores de la paleta y bomba de masa, se usó la opción del autotuning o autoajuste para los variadores de frecuencia que comandan el movimiento de estos

motores, estos son variadores PowerFlex 525 de la marca Allen Bradley. Según el manual del fabricante existen 2 tipos de autoajuste, el estático y el rotativo. El autoajuste estático se aplicó luego de un ciclo de operación de la máquina, este consiste en una prueba de resistencia del estator del motor para un mejor ajuste de la caída de tensión sobre la resistencia del estator, por lo que se recomienda que el devanado del motor no esté frío. Se recomienda que seguido al autoajuste estático, se realice un autoajuste rotativo, el cual se debe realizar desacoplando la carga del motor, este procedimiento permite obtener el valor de la corriente en vacío a plena velocidad del motor.

**Figura 3.14**

*Procedimiento para realizar autotune en variadores PowerFlex 525*

**P040 [Autotune]**

 Stop drive before changing this parameter.

Enables a static (not spinning) or dynamic (motor spinning) autotune to automatically set the motor parameters. Set the parameter value to a one or two, then issue a valid "Start" command to begin the routine. After the routine is complete the parameter resets to a zero. A failure (such as if a motor is not connected) results in an Autotune Fault. It is recommended to perform a full rotate tune when using VVC mode.

---

**IMPORTANT** All motor parameters in the Basic Program group must be set before running the routine. If a start command is not given (or a stop command is given) within 30 s, the parameter automatically returns to a zero and an Autotune Fault occurs.

---



**ATTENTION:** Rotation of the motor in an undesired direction can occur during this procedure. To guard against possible injury and/or equipment damage, it is recommended that the motor be disconnected from the load before proceeding.

---

	0	"Ready/Idle" (Default)	
	1	"Static Tune"	A temporary command that initiates a non-rotational motor stator resistance test for the best possible automatic setting of <a href="#">A496</a> [IR Voltage Drop]. A start command is required following initiation of this setting. The parameter returns to 0 "Ready/Idle" following the test, at which time another start transition is required to operate the drive in normal mode. Used when motor cannot be uncoupled from the load.
<b>Options</b>	2	"Rotate Tune"	A temporary command that initiates a "Static Tune" followed by a rotational test for the best possible automatic setting of <a href="#">A497</a> [Flux Current Ref]. A start command is required following initiation of this setting. The parameter returns to 0 "Ready/Idle" following the test, at which time another start transition is required to operate the drive in normal mode. Important: Used when motor is uncoupled from the load. Results may not be valid if a load is coupled to the motor during this procedure. If [P039 = 5], it is the same with "Static Tune".

---

### 3.1.3.3 Programación

La programación de la divisora se encuentra desarrollada para el software RSLogix 500 que es para equipos más antiguos de la marca Allen Bradley, una migración completa de toda la tecnología incurriría cambiar toda la programación para ser usada en un Studio 5000 que un software que usan los equipos actuales de la marca Allen Bradley. En Studio 5000 se desarrolla

la lógica de programación del PLC que enviará las instrucciones de movimiento al servodrive kinetix 5500 que controla al nuevo servomotor.

**Figura 3.15**

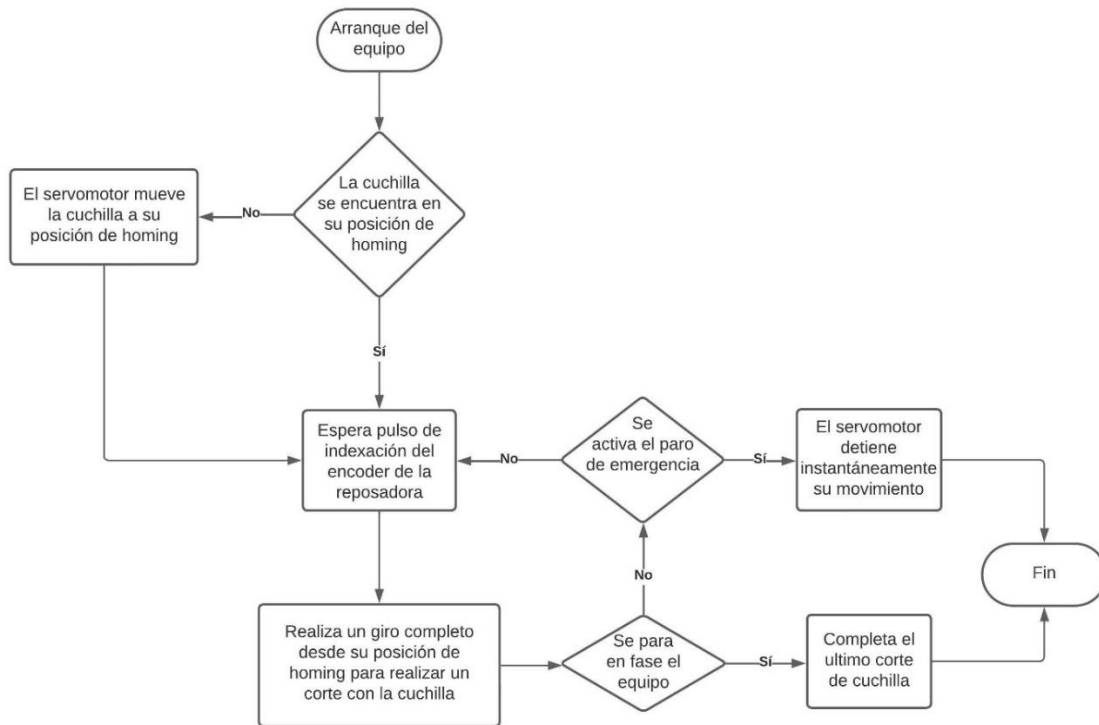
*RSLogix 500 y Studio 5000*



En la Figura 3.16 se muestra el pseudocódigo que sigue la programación implementada en el PLC implicado en la migración del sistema de corte. Analizando el programa original y luego de pruebas realizadas se obtuvo la lógica de programación para el cambio de servodrive y servomotor. Una vez se le da marcha al equipo, arrancan los motores correspondientes al tornillo, paleta y bomba de masa, la cuchilla busca su posición de homing y realiza un corte por cada pulso de indexación que recibe del encoder de la reposadora, el fin del proceso ocurre cuando el sistema se ha parado en ciclo o por emergencia como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 3.16.

**Figura 3.16**

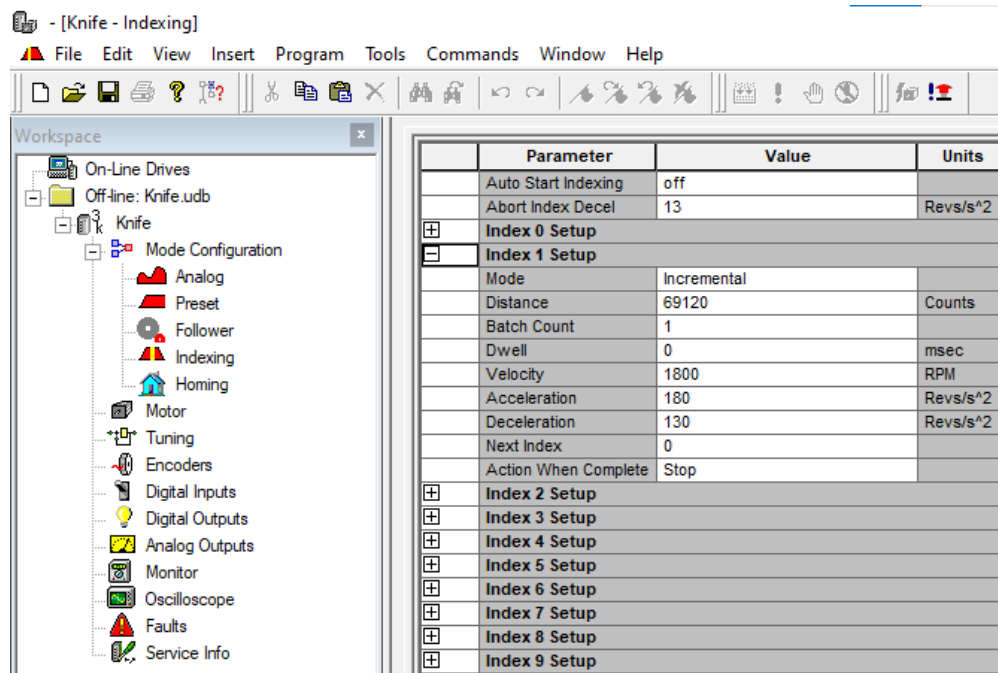
*Diagrama de flujo de la lógica de programación que usa el sistema de corte*



El servo drive Ultra 3000 instalado originalmente en el equipo se comunica con el PLC mediante entradas y salidas digitales, mediante esta comunicación se indica al drive cuando habilitarse, deshabilitarse, reiniciar fallas, la señal de homing y el pulso de indexación. El drive Ultra 3000 cuenta con el software UltraWARE que tiene la configuración de movimiento, con el que el servomotor debe realizar indexaciones o giros, además de la configuración que tiene cada entrada y salida que se comunica con el PLC como se muestra en las Figura 3.18, Figura 3.19 y Figura 3.20.

**Figura 3.17**

*Características del movimiento aplicado en cada indexación*



**Figura 3.18**

*Configuración de entradas digitales del drive ULTRA 3000*

Parameter	Value	Units
Input 1	Preset Select 0	
Input 2	Preset Select 1	
Input 3	Preset Select 2	
Input 4	Drive Enable	
Input 5	Home Sensor	
Input 6	Start Homing	
Input 7	Start Indexing	
Input 8	Reset Drive	

**Figura 3.19**

*Configuración de salidas digitales del drive ULTRA 3000*

Parameter	Value	Units
Output 1	In-Position	
Output 2	Drive Enabled	
Output 3	In Motion	
Output 4	Unassigned	
Relay	Unassigned	
Brake Active Delay	0	milliseconds
Brake Inactive Delay	0	milliseconds

El servo drive kinetix 5500 tiene toda su configuración y programación en el software Studio 5000. A través del puerto ethernet se envían las diferentes instrucciones que se hacían por puertos digitales físicos con el anterior drive por lo que no se requieren igual cantidad de entradas y salidas. La unidad escalada en Studio 5000 es el grado por lo que se convierten las unidades de los parámetros de movimiento de la Figura 3.17 a las unidades derivadas de la unidad básica configurada.

**Figura 3.20**

*Configuración de las características de movimiento para el servomotor en Studio 5000*

MAM		
Axis	Servo_Knife	(EN)
Motion Control	knife.MAM[0]	
Move Type	1	(DN)
Position	360	(ER)
Speed	10800	(IP)
Speed Units	Units per sec	(PC)
Accel Rate	64800	
Accel Units	Units per sec <sup>2</sup>	
Decel Rate	46800	
Decel Units	Units per sec <sup>2</sup>	
Profile	Trapezoidal	
Accel Jerk	100	
Decel Jerk	100	
Jerk Units	% of Maximum	
Merge	Disabled	
Merge Speed	Programmed	
Lock Position	0	
Lock Direction	None	
Event Distance	0	
Calculated Data	0	

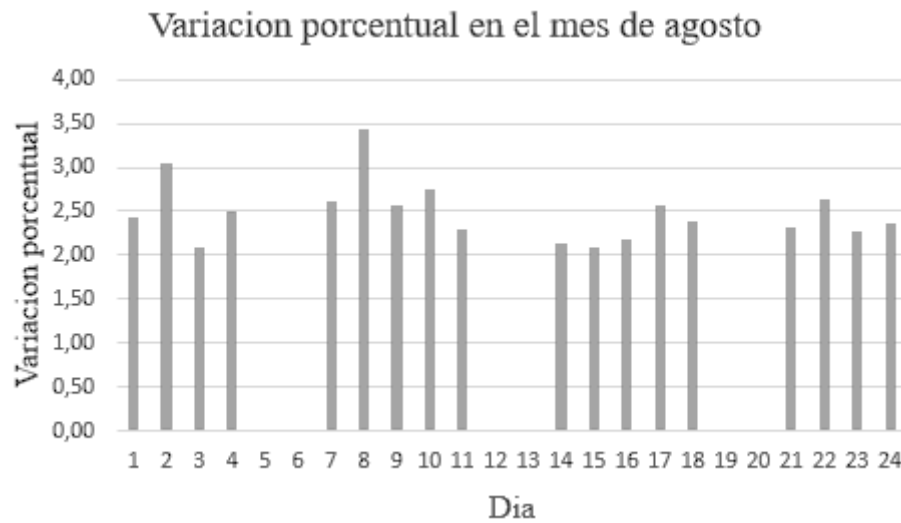
### 3.1.4 Resultados finales

Una vez realizado la implantación de cada una de los sistemas mecánico, eléctrico y control, se procedió a tomar una muestra de datos. A partir de dichos datos se realizó una gráfica de la variación porcentual de peso que este presenta, obteniendo la gráfica de la Figura 3.21.



**Figura 3.21**

*Grafica de la variación porcentual de peso en el mes de agosto*



La implementación se realizó en el mes de agosto en el día 11, como se puede observar al realizar los cambios, la variación porcentual de peso no supera el 3%. Adicionalmente, se obtuvo un promedio de variación hasta el día 10 de 2.68% y desde el día 11 hasta el 24, se obtuvo un valor de 2.32%. A partir de lo observado se apreció una tendencia a la baja en la variación de peso del producto.

## **3.2 Análisis**

### **3.2.1 Análisis de costos**

En la tabla 3.1 se detallan los componentes usados para la implementación del proyecto, el cual se encuentra dividido en varios sistemas, los cuales son el sistema mecánico, eléctrico y control y otros.

**Tabla 3.1***Cotización de componentes usado en el proyecto*

<b>Tipo de sistema</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio UNIT (USD)</b>	<b>Precio Total (USD)</b>
<b>Mecánico</b>	Fabricación del Acople tipo araña	1	u	\$ 740,00	\$ 740,00
	PLC ControlLogix5575	1	u	\$ 15.175,59	\$ 15.175,59
<b>Electico y Control</b>	Servodrive Kinetix 5550	1	u	\$ 5.953,00	\$ 5.953,00
	Servomotor VPL-A1303F-PJ12AA	1	u	\$ 2.115,00	\$ 2.115,00
<b>Otros</b>	Instalación y cableado	-	u	\$ 1.580,00	\$ 1.580,00
	Viáticos	-	u	\$ 600,00	\$ 600,00
				<b>TOTAL</b>	<b>\$26.163,59</b>

Tal y como se observa en la tabla, el sistema que presentó mayores gastos fue la parte eléctrica y control, esto debido a que el proyecto se centra en la migración de tecnología por lo que fue necesario la adquisición de varios componentes. A pesar del costo que este presenta, cabe recalcar que el cliente ya contaba con los componentes del sistema eléctrico y control, por lo que el gasto real del proyecto se limitaría a el diseño mecánico de la pieza y la instalación de los componentes, incluyendo cableado, fabricación y viáticos.

## **Capítulo 4**

## **4.1 Conclusiones y recomendaciones**

### **4.1.1 Conclusiones**

La optimización del control realizada en los componentes tornillo, paleta y bomba de masa, que integran el sistema de extrusión junto a la migración tecnológica aplicada en el sistema de corte, reemplazando servomotor y servo drive por versiones más actualizadas resultaron ser una repotenciación efectiva, con opción a realizar más modificaciones, para mejorar el control de pesos en las bolas de masa extruidas por la divisora de bollería.

La migración del servo drive ULTRA 3000 con número de catálogo 2098-DSD-020X y el servomotor N-5630-2-H00AA, al servodrive Kinetix 5500 con número de catálogo 2198-H040-ERS y el servomotor VPL-A1303F-PJ12AA, redujo el número de entradas y salidas físicas usadas de los módulos del PLC, pero implicó agregar un nuevo controlador lógico programable, lo que abre puertas a una migración completa de la lógica de programación y control de los equipos originales del tablero de divisora de bollería.

Se optimizó el sistema de control de presión que implica al transductor de presión de diafragma y al tornillo de la máquina de divisora de bollería usando el primer método de sintonización de constantes PID de Ziegler Nichols, obteniendo menor variación y estabilidad con respecto al set point de presión ingresado en la máquina.

Se desarrollaron esquemas eléctricos y mecánicos que permitieron realizar las correspondientes mejoras al equipo, obteniendo los archivos modificables de estas mejoras como punto de partida para realizar nuevas actualizaciones, adquisición de refacciones o reparaciones que permitan mejorar la gestión del mantenimiento del equipo.

### **4.1.2 Recomendaciones**

Para facilitar la implementación de mejoras en una máquina de una línea de producción industrial, se debe contar con el apoyo e interés de la mayor cantidad de departamentos posibles

de esa empresa, así obtener espacios de tiempo para realizar pruebas, mayor tiempo para aplicar mejoras a la máquina y recibir una retroalimentación constante de los resultados obtenidos conforme se vayan aplicando mejoras al equipo.

Se recomienda aplicar el autoajuste rotativo, desacoplando la carga del motor como indica el manual del fabricante de los variadores que comandan los motores de tornillo, paleta y bomba de masa para mejorar la precisión del control de velocidad, disminuyendo en mayor magnitud la variación de pesos causada por la entrada de perturbaciones al sistema.

Se recomienda una migración completa de tecnología, esto es cambiar el controlador lógico programable original del equipo por una versión moderna del fabricante lo que implica cambiar la lógica de programación de un software antiguo a uno actualizado del fabricante, además que se incluiría la lógica de programación realizada para la migración tecnológica del sistema de corte que se realizó en otro PLC.

## Referencias

- [1] F. A. Alvarez Echeverría. "Implementación de nuevas tecnologías: Valuación, variables, riesgos y escenarios tecnológicos". Universidad Francisco Gavidia. <http://ri.ufg.edu.sv/jspui/bitstream/11592/8803/1/601-A473i> (accedido el 8 de junio de 2023).
- [2] J. L. González Márquez y Y. P. Romero Doylethy. "La innovación tecnológica en las empresas y su impacto positivo". Grupo Eumed.net. <https://www.eumed.net/rev/oel/2018/03/innovacion-empresas-ecuador.html> (accedido el 8 de junio de 2023).
- [3] S. User. "Bimbo ecuador". Inicio | Dora Sistemas. <https://www.dorasistemas.com/empresa/casos-de-exito/item/21-bimbo-ecuador#:~:text=Entre%20sus%20productos%20se%20encuentran%20los%20panes%20de,líder%20en%20Ecuador%20en%20la%20industria%20de%20panificación.> (accedido el 8 de junio de 2023).
- [4] F. Lara. "Las 100 mayores empresas de la industria alimenticia del Ecuador". [www.vistazo.com](http://www.vistazo.com). <https://www.vistazo.com/enfoque/las-mayores-empresas-de-la-industria-alimenticia-del-ecuador-FEVI205606> (accedido el 8 de junio de 2023).
- [5] "La industria panificadora se halla en crecimiento". Revista Líderes - Negocios, Empresas, Emprendimientos Ecuador. <https://www.revistalideres.ec/lideres/industria-panificadora-crecimiento-ecuador-produccion.html> (accedido el 8 de junio de 2023).
- [6] "Ecuador: Sector panificador del país apuntala su crecimiento después de la pandemia | Noticias Agropecuarias". Noticias Agropecuarias | Noticias Ecuador, Agrícolas, Banano, Camaron, Videos. <https://elproductor.com/2021/03/ecuador-sector-panificador-del-pais-apuntala-su-crecimiento-despues-de-la-pandemia/> (accedido el 9 de junio de 2023).

- [7] S. M. García Castro. "Reducción del sobrepeso en masas procesadas por la máquina boleadora en la línea de panadería de la empresa paniqueso". Biblioteca Digital USB - Universidad de San Buenaventura ::Inicio. <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/server/api/core/bitstreams/68338cbe-d4c9-4f59-8304-df8c5ac057aa/content> (accedido el 9 de junio de 2023).
- [8] "Producción más eficiente con las controladoras de peso en red de Mettler Toledo". Interempresas. <https://www.interempresas.net/Farmacacia/Articulos/165008-Produccion-mas-eficiente-con-las-controladoras-de-peso-en-red-de-Mettler-Toledo.html> (accedido el 9 de junio de 2023).
- [9] "C33 plusline WD controladora de peso". Professionelle Waagen für Gewerbe & Industrie | METTLER TOLEDO. [https://www.mt.com/mx/es/home/products/Product-Inspection\\_1/checkweighing/C33-Washdown.html](https://www.mt.com/mx/es/home/products/Product-Inspection_1/checkweighing/C33-Washdown.html) (accedido el 15 de junio de 2023).
- [10] "Descripción del sistema de producción del pan blanco Bimbo". gestiopolis. <https://www.gestiopolis.com/descripcion-del-sistema-de-produccion-del-pan-blanco-bimbo/> (accedido el 15 de junio de 2023).
- [1] R. Automation. "Kinetix 5500 servo drive system". Rockwell Automation. [https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/knx-rm009\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/knx-rm009_-en-p.pdf).
- [12] AMF Machinery Systems, "Accumax 600", Guayaquil, Electrical Documentation, enero de 2019.
- [13] A. Bradley. "Ultra3000 digital servo drives to kinetix 5500 servo drives". Rockwell Automation. [https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/ap/2098-ap002\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/ap/2098-ap002_-en-p.pdf).

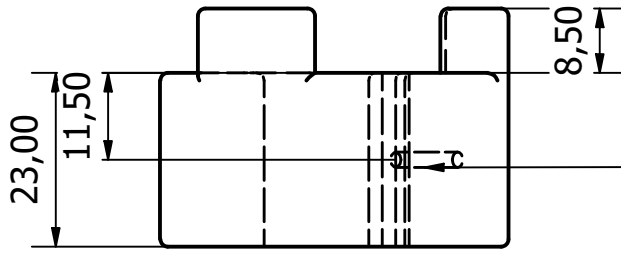
- [14] "▷ Todo sobre Ziegler Nichols - Sintonia de Control PID". Control Automático Educación. [https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/ziegler-nichols-sintonia-de-control-pid/#Cuidados\\_del\\_Metodo\\_1](https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/ziegler-nichols-sintonia-de-control-pid/#Cuidados_del_Metodo_1) (accedido el 11 de agosto de 2023).



## **Apéndice**

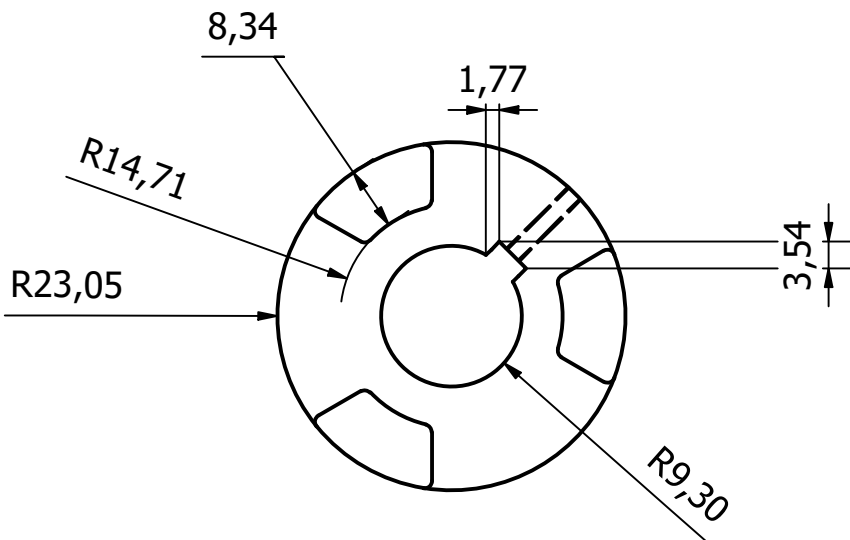
# **Apéndice A**

## **Planos mecánicos**

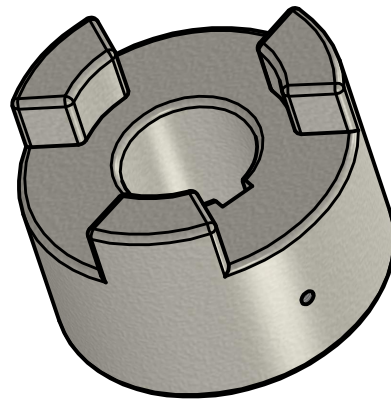


Ø2,00 -11,60 Profundidad

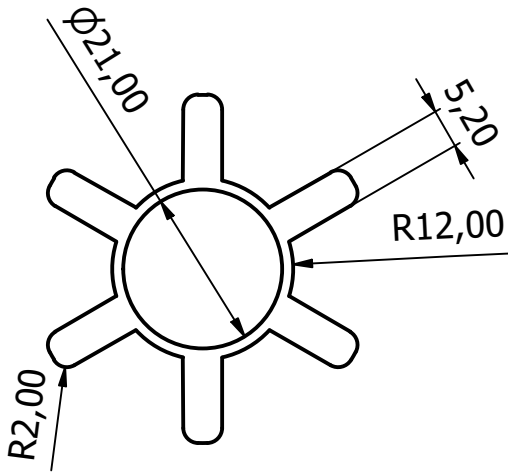
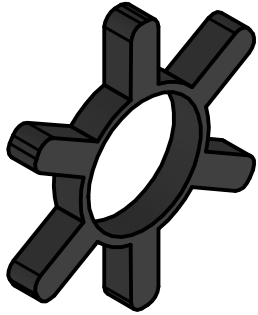
VISTA2 ( 1 : 1 )



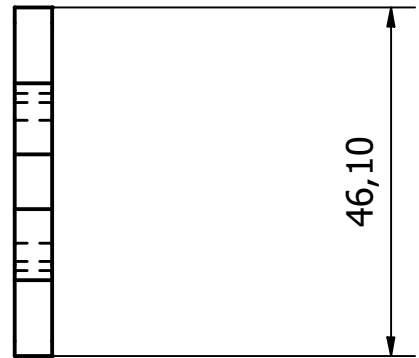
VISTA1 ( 1 : 1 )



Diseño de Wilsinton Ortega	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 23/8/2023	
ESPOL			PLANO MECÁNICO		
			PLANO DEL ACOUPLE	Edición	Hoja 1 / 1

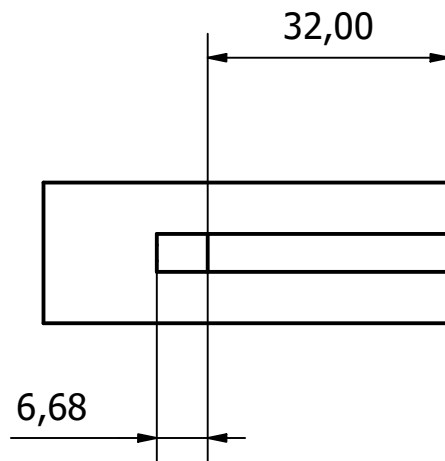
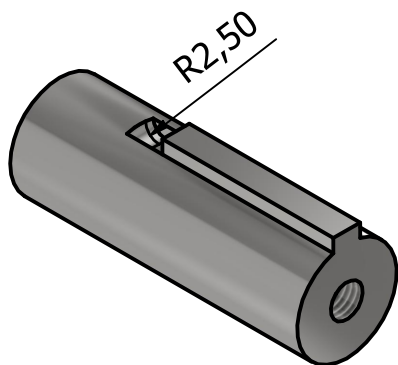
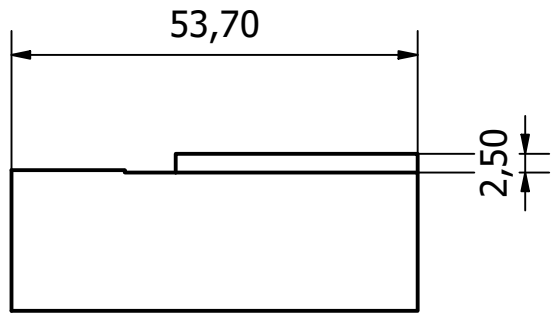
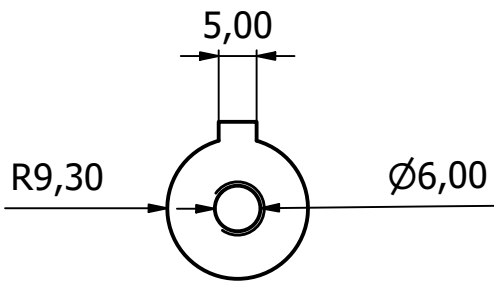


VISTA1 ( 1 : 1 )



VISTA2 ( 1 : 1 )

Diseño de Wilsinton Ortega	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 23/8/2023	
ESPOL			PLANO MECÁNICO		
			PLANO ELASTÓMETRO	Edición	Hoja 1 / 1



Diseño de Wilsinton Ortega	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 23/8/2023	
ESPOL			PLANO MECÁNICO		
			PLANO DEL EJE	Edición	Hoja 1 / 1

## Apéndice B

### Programación

**Tabla B.1**

*Función de las entradas usadas por el drive ULTRA 3000*

PLC	DRIVE	FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
<b>O1200</b>	CN31	PRESET SELECT 0	Según la combinación binaria de estas entradas se escoge
<b>O1201</b>	CN32	PRESET SELECT 1	entre un valor otro para seleccionar la configuración de velocidad y aceleración de trabajo del servo, se puede
<b>O1202</b>	CN33	PRESET SELECT 2	omitir y enviarse directamente la configuración de velocidad y giro al servo.
<b>O1203</b>	CN34	DRIVE ENABLE	No es necesaria según manual de migración, se puede reemplazar por función <b>MSO</b> .
<b>I514</b>	CN35	HOME SENSOR	Recibe la señal de home del sensor inductivo que lee la leva de la cuchilla.
<b>O1205</b>	CN37	START HOMING	Realiza el homing de la cuchilla, se reemplaza por <b>MAH</b> .
<b>O1206</b>	CN36	START INDEX	Ancho de pulso de la señal de entrada de indexación, señal habilitadora para que se ejecute el movimiento.
<b>O1207</b>	CN38	RESET FAULT	No es necesario ya que se puede reemplazar con una función <b>MASR</b> o <b>MAFR</b> de motion que realice el reset del drive, cuando se presione el reset del panel.

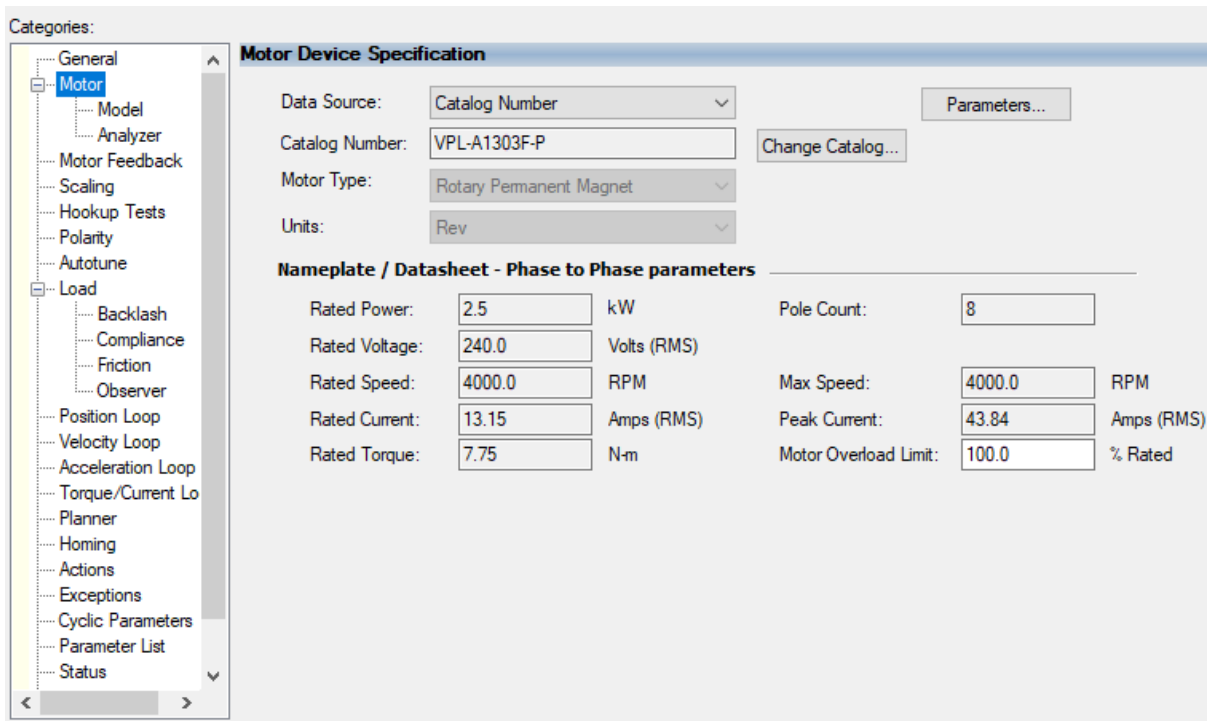
**Tabla B.2**

*Función de las salidas digitales usadas por el drive ULTRA 3000*

PLC	DRIVE	FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
I511	CN39	IN POSITION	Recibe la señal de home del sensor inductivo que lee la leva de la cuchilla
I512	CN40	DRIVE ENABLED	Ancho de pulso de la señal de entrada de indexación, se puede reemplazar por una función <b>MAM</b>  No es necesario ya que se puede reemplazar con una función
I513	CN41	IN MOTION	<b>MASR</b> o <b>MAFR</b> de motion que realice el reset del drive cuando se presione el reset del panel

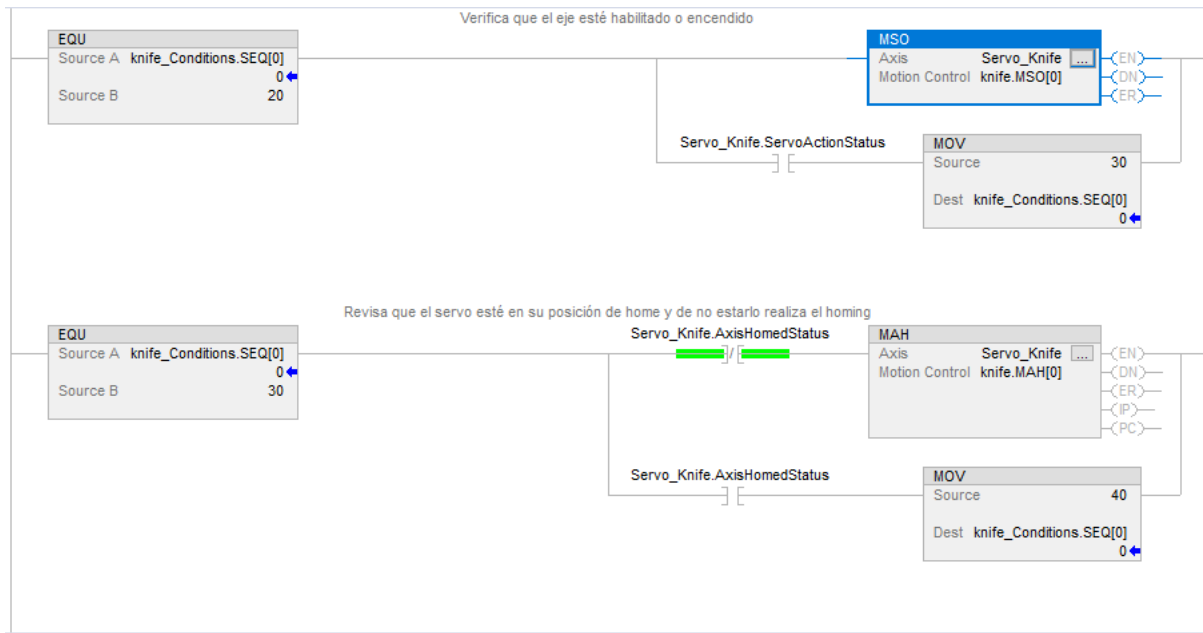
**Figura B.1**

*Servomotor dado de alta en Studio 5000.*



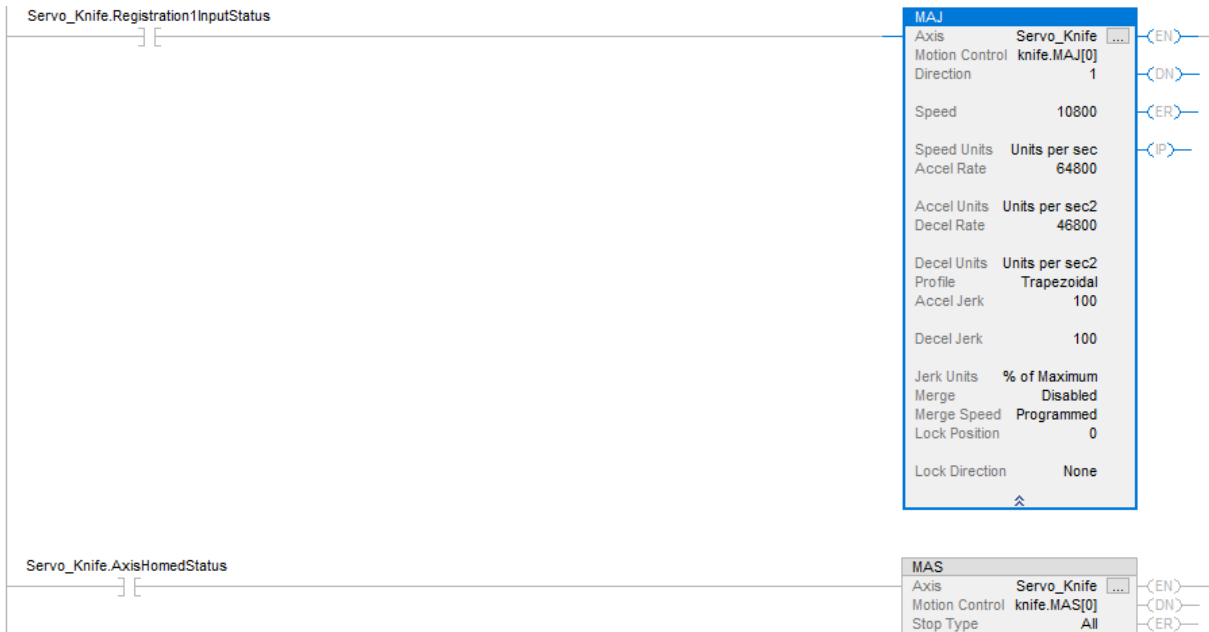
**Figura B.2**

*Renglones de programación para el encendido del servomotor en Studio 5000*



**Figura B.3**

*Renglones con la lógica de indexación de corte.*







## Apéndice C

### Implementación

**Figura C.1**

*Eje nuevo realizado para acoplar el nuevo servomotor.*



**Figura C.2**

*Nuevo servomotor acoplado al sistema de corte de la divisora de bollería.*

