



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Sede Bogotá

PROYECTO INDUSTRIAL

Profesor:
Victor Hugo Grisales

Asignatura:
Servomecanismos

Grupo de trabajo:
UNservo

Integrantes:
Juan Andrés Barrera Rodríguez
Nicolás Prieto Solano
Andrés Sebastian Serna Montaña
Juan Pablo Ortiz Mendoza

06 de Diciembre del 2023



Índice

1. Introducción	2
2. Objetivos del Proyecto	2
3. Reporte técnico	3
3.1. Parametrización de la trayectoria	3
3.2. Diseño de rutinas	3
3.2.1. Diseño de grafcet	3
3.2.2. Programación ladder	5
3.3. Control de movimiento	6
3.3.1. Arquitectura de comunicaciones	6
3.4. Validación	7
4. Reporte de proceso	8
4.1. Gestión de proyecto	8
4.2. Trabajo colaborativo	8
4.3. Proceso de aprendizaje	9
4.4. Recomendaciones	9
5. Análisis de resultados	10
6. Conclusiones	11



1. Introducción

El presente informe detalla el desarrollo de un proyecto industrial dedicado a la programación de control de movimiento en una aplicación de máquina con tres grados de libertad, específicamente en los ejes X, Y y Z. Este proyecto se llevó a cabo con el objetivo principal de parametrizar, programar y validar rutinas de control que permitieran lograr un movimiento coordinado y preciso en cada uno de estos ejes.

La metodología adoptada para la programación se basó en el uso del lenguaje Ladder, empleando instrucciones de bloques de movimiento especializadas. Este enfoque facilitó la creación de rutinas eficientes y robustas para garantizar un control óptimo de los movimientos industriales necesarios para la aplicación en cuestión.

La validación del sistema se llevó a cabo mediante el monitoreo de las tendencias (trends) proporcionadas por el software Studio 5000, que ofreció perfiles de movimiento detallados para los ejes X, Y y Z. Además, se empleó un gemelo digital de la máquina, desarrollado específicamente para pruebas en el software Siemens NX, con el fin de asegurar la precisión y fiabilidad del control de movimiento implementado.

A lo largo de este informe, se presentarán los detalles técnicos de la programación, los resultados obtenidos durante las fases de prueba y validación, así como las lecciones aprendidas a lo largo de este proceso, consolidando así el éxito de este proyecto en el ámbito del control de movimiento industrial.

2. Objetivos del Proyecto

El objetivo general de este proyecto es desarrollar y validar rutinas de control de movimiento industrial para una aplicación de máquina con tres grados de libertad (Ejes X, Y y Z). Se busca lograr un sistema de programación en lenguaje Ladder que permita el movimiento coordinado y preciso de estos ejes, garantizando un funcionamiento eficiente y confiable de la maquinaria.

Adicionalmente, se presentan los siguientes objetivos específicos:

1. Configurar los parámetros necesarios para cada eje de la máquina, estableciendo las características específicas de movimiento requeridas.
2. Programar las rutinas de control en lenguaje Ladder, utilizando instrucciones de bloques de movimiento para cada uno de los ejes X, Y y Z.
3. Utilizar el software Studio 5000 para monitorear y analizar las tendencias de movimiento de los ejes, asegurando la coherencia y precisión de las rutinas programadas.
4. Realizar pruebas de movimiento en el gemelo digital de la máquina en el entorno Siemens NX, validando el correcto funcionamiento del sistema en un contexto simulado.
5. Identificar posibles mejoras en las rutinas de control mediante análisis de rendimiento y eficiencia.
6. Ajustar y optimizar las rutinas de programación para lograr un movimiento más fluido y una respuesta más rápida de la maquinaria.

El cumplimiento de estos objetivos contribuirá al éxito de este proyecto y demostrará la aplicabilidad de los conocimientos adquiridos en la clase de Servomecanismos.



3. Reporte técnico

3.1. Parametrización de la trayectoria

Para el calculo de los parámetros para los perfiles de movimiento trapezoidales se empieza estableciendo que la velocidad con la que se va a trabajar es 5 cajas por minuto. A partir de esto se supone un tiempo de ciclo de 10 segundos y de semi-ciclo de 5 segundos, con el fin de que se tuviera un poco de margen para finalizar los ciclos y reiniciarlos.

$$a \geq \frac{4L}{t^2} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta este tiempo y la ecuación 1 extraída de la guía del proyecto [?] se calcula la aceleración mínima para el primer perfil Y que recorrerá 3m en un tiempo de 5 segundos y los perfiles X y Y que compartirán aceleración al recorrer $\frac{\pi}{2}$ radianes en 2.5 segundos.

$$\frac{4 * 3}{5^2} = 0,48$$

$$\frac{4 * \frac{\pi}{2}}{2,5^2} = 1,0053$$

A los valores resultantes se les da un incremento del 25 % para tener un margen y que el sistema no se encuentre tan cerca a los valores limite, dejando para el eje Y una aceleración de $0.6 \frac{m}{s^2}$ y para los otros 2 ejes una aceleracion de $1.25 \frac{rad}{s^2}$.

$$V_{max} = \frac{at - a\sqrt{t^2 - 4\frac{L}{a}}}{2} \quad (2)$$

Ahora para el calculo de las velocidades máximas se emplea la ecuación 2, remplazando con los parámetros obtenidos con anterioridad para cada uno de los ejes.

$$\frac{0,6 * 5 - 0,6 * \sqrt{5^2 - 4\frac{3}{0,6}}}{2} = 0,8291 \frac{m}{s}$$

$$\frac{1,25 * 2,5 - 1,25 * \sqrt{2,5^2 - 4\frac{\frac{\pi}{2}}{1,25}}}{2} = 0,8711 \frac{rad}{s}$$

Para el proceso de volver a la posición inicial se usan los mismo perfiles de movimiento que para la rutina de ida.

Además, en las relaciones matemáticas utilizadas en las rutinas, también se calculó el espacio recorrido (L) con la ecuación:

$$L = \frac{V_{max}^2}{a} + V_{max} \left(t - \frac{2 \cdot V_{max}}{a} \right)$$

A partir de esto, se pudo obtener la posición longitudinal, para el caso del eje Y, o angular, para el caso de los ejes X y Z, en cualquier instante de tiempo requerido. Con esto, se tiene mayor precisión en las rutinas y se tiene un mayor control de las trayectorias.

3.2. Diseño de rutinas

3.2.1. Diseño de graficet

Este es el primer diseño que se realiza de una máquina, esto con el fin de dar inicio a una prueba de el funcionamiento esperado del mecanismo o del proceso. Para esto es necesario haber establecido



previamente el objetivo del proceso, o los pasos principales, para ir desglosando paso a paso como se ira moviendo el proceso, teniendo en cuenta que lo activa o desactiva.

Para nuestro caso se realizo teniendo en cuenta que el paso inicial es el boton de arranque, luego de esto, se reinicia todo el sistema en OFF, para asi proceder al arranque de la maquinaria, para eso se da inicio , se activa el conveyor, el cambio de estado del sensor de entrada de material al sistema, que es en este caso la caja de cartón para ser formada.

Con esto entre manos, comienza la operación de la máquina. Se activan los ejes dondes estan posicionadas las ventosas, para esto se crearon lo bloques que vienen predeterminados por Rockwell en el Studio5000; por tal razón dentro del grafcet se colocan esos nombre a los estados de los ejes, empieza el formado en el eje Y y el Z, luego de que entra en ese estado, se activa el estado del eje Z, cuando estos dos estados son validos, arranca el eje X y el eje Y, luego de que estos dos estados son validos, se tiene los tres ejes activos, según el perfil de velocidades, ya sea uno en subida u otro en bajada como se observa en los perfiles de velocidad. Esto permite que luego de que el eje X y Y esten activos, se detenga los tres ejes.

En la primera parte de la rutina se da el formado de la caja, esto se da primero activando el eje Z que toma la caja y el eje c la termina de abrir mientras el eje Y es quien permite la llegada del brazo a donde esta posicionada la caja para realizar el proceso. por ultimo a mitad de recorrido, es donde empieza la segunda parte del semiciclo, durante todo este tiempo se tiene el conveyor encendido, cuando el eje y se repliega a Home, deja la caja posicionada sobre el conveyor, retrae los brazo dando asi completo un ciclo, la ultima instrucción a realizar es detener los motores y resetear las variables para dar paso al inicio de la rutina de nuevo, y así sucesivamente, todo esto para lograr la fabricación e 5 cajas pro minuto con la formadora.

A continuación se muestra el grafcet planteado para esta máquina.

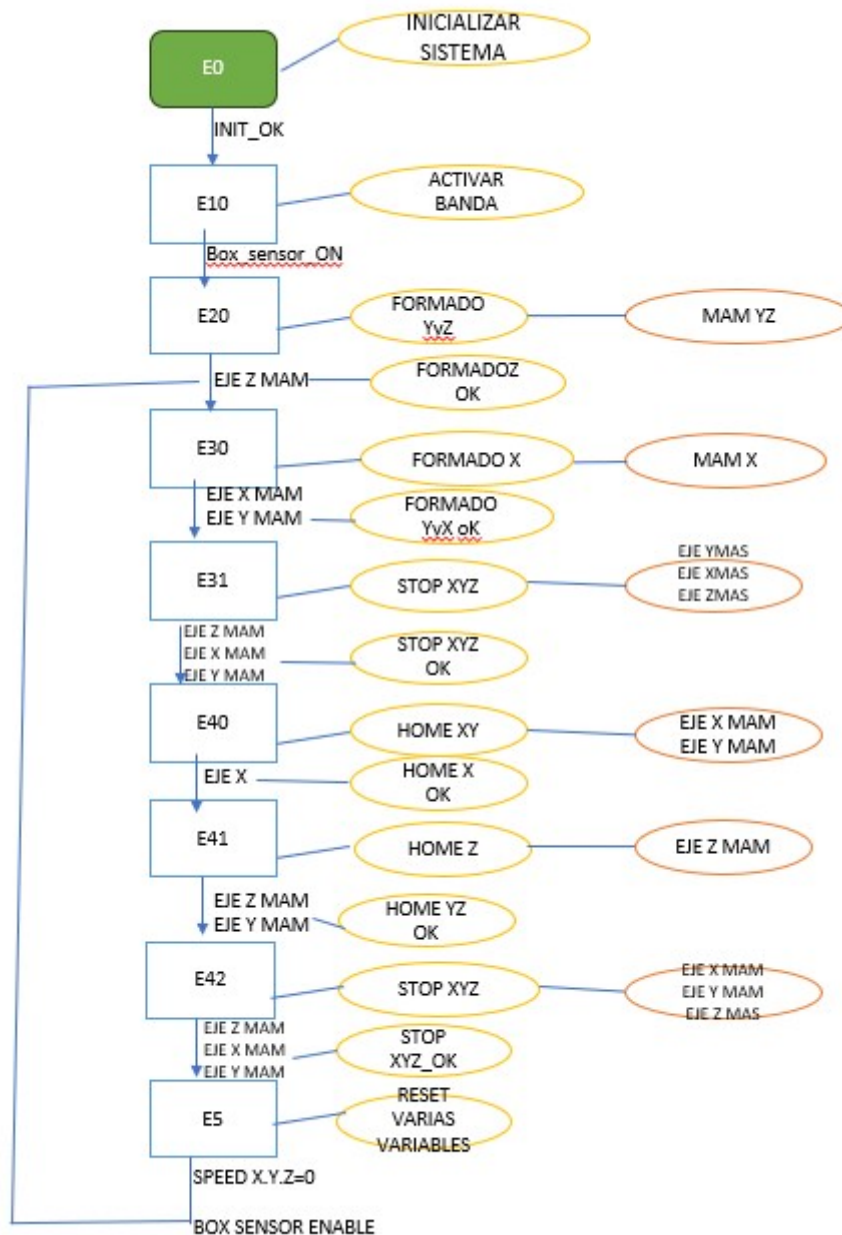


Figura 1. GRAFCET

3.2.2. Programación ladder

Gran parte del código para el desarrollo en Ladder ya se encontraba en el archivo, por lo que se trabaja principalmente dentro de las rutinas de "B.Process.Formatoz de C.Process.Home", para las sección de código de formado se utilizan los bloques de tipo MAM y MAS ya ubicados dentro del programa, cambiando únicamente los valores de posición, velocidad y aceleración por los calculados.

Para la sección de regreso a home, se utilizaran los mismos bloques de código que para la rutina de formado, cambiando únicamente la posición a la que debe llegar al final de esta. Teniendo en cuenta la restricción de un máximo de ejes de movimiento simultáneos, siendo este 2, se moverá el eje Y durante

5 segundos durante los cuales también se moverá el eje Z durante los primeros 2.5 segundos y luego el eje X durante el tiempo restante.

3.3. Control de movimiento

3.3.1. Arquitectura de comunicaciones

Esta parte es esencial en la automatización de equipos, ya que con esta se entiende el lenguaje que se está utilizando entre equipos, por esto es importante determinar y organizar la jerarquía de la comunicación, según la pirámide de la automatización. En este caso tenemos los equipos que están en operación, luego los equipos que están en el mando dando las ordenes, nosotros en el curso llegamos hasta el segundo escalón de la pirámide. mas adelante se da la parte de supervisión, gestión y toma de decisiones.



Figura 2. Pirámide de automatización

A partir de esto, se crea la arquitectura de comunicación, teniendo nosotros la gestión entre equipos reales, que en esta ocasión no se utilizaron, y el gemelo digital que es un paso dentro de la industria 4.0.

Con esto se obtiene que los sensores y los actuadores están por debajo de el controlador PLC y el driver, luego se da el arranque de la interacción entre el sistema digital y el sistema real, por medio de comunicación ethernet que maneja el controlador PLC. A continuación se muestra la arquitectura de comunicaciones para este proceso automatizado.

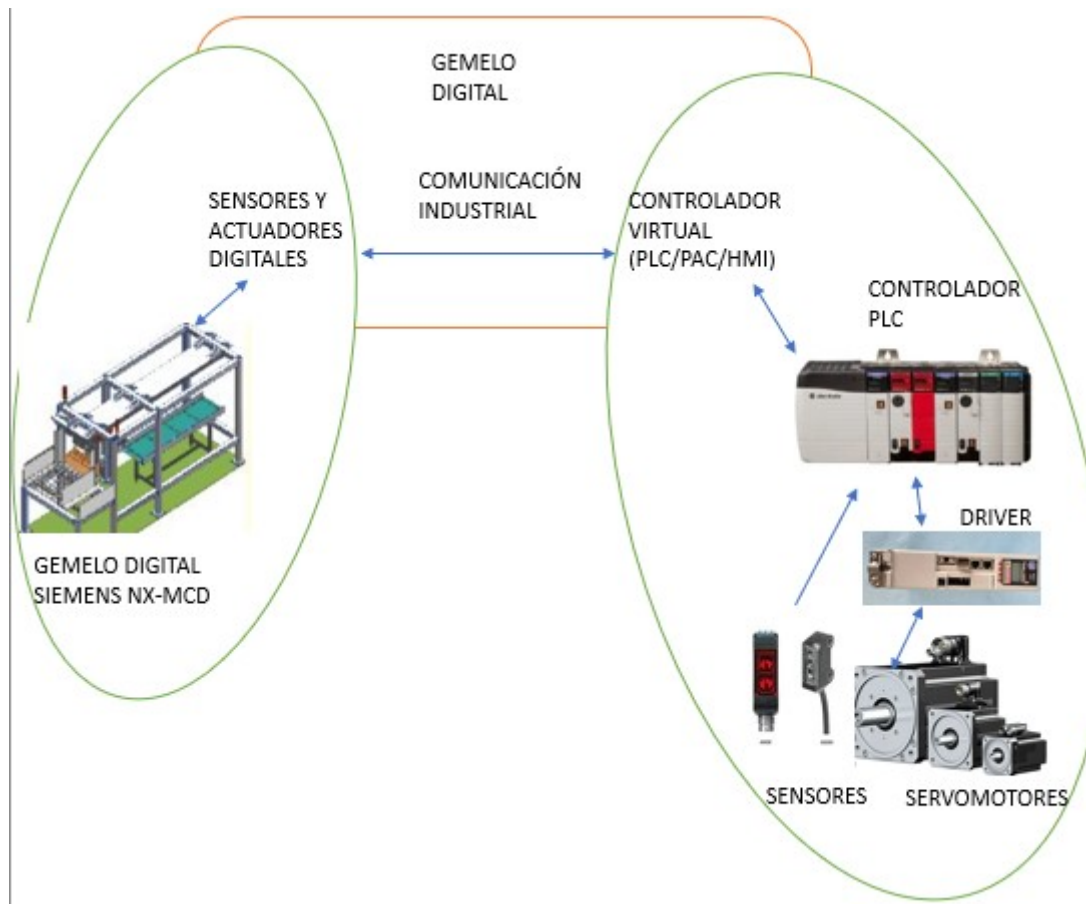


Figura 3. Arquitectura de comunicaciones

3.4. Validación

Con el fin de verificar que todos los perfiles y rutinas de movimiento cumplieran con los requerimientos, fue necesario realizar la validación correspondiente de cada uno de estos elementos, la validación para cada uno de estos elementos se describirá detalladamente a continuación:

- Validación de los perfiles de movimiento:

En el software de Studio 5000 y usando la herramienta 'trends' previamente configurada, era posible ver la velocidad de cada uno de los ejes en función del tiempo. Una vez se observó que los perfiles tenían un comportamiento trapezoidal como se había pensado originalmente, se analizó detalladamente el periodo para así comprobar que los perfiles de velocidad cumplieran con los requerimientos. Los perfiles de velocidad obtenidos se muestran a continuación:

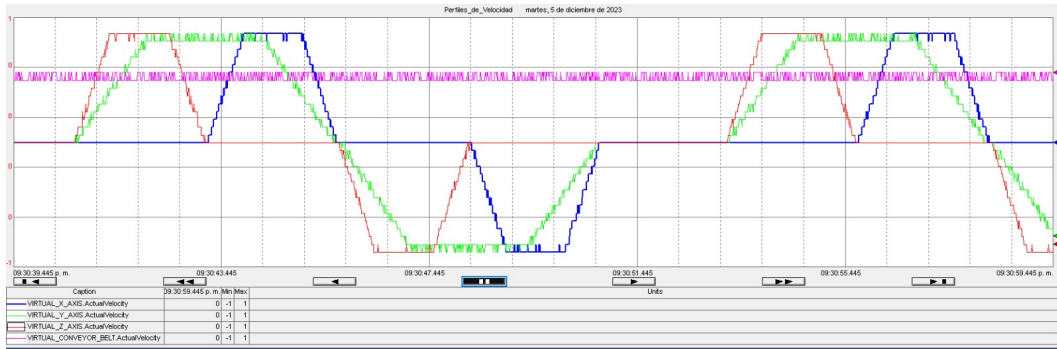


Figura 4. Validacion perfiles de velocidad

Como se puede ver en la imagen, periodo de los perfiles de velocidad es de 10 segundos aproximadamente por lo que se puede concluir que este tiempo concuerda con el periodo establecido previamente, además de cumplir con los requerimientos de producción al tener una velocidad aproximada de 6 cajas por minuto.

- Validación de rutinas de movimiento: Para validar que las rutinas de movimiento planteadas en el código Ladder estuvieran correctamente definidas, fue necesario usar el software 'Siemens NX' junto con el gemelo digital de la maquina formadora de cajas que fue suministrada por el profesor, posteriormente se ejecuto el codigo de Ladder y se simulo el comportamiento de la maquina. Luego se estudio dicho comportamiento y fue posible observar que la maquina formaba una caja cada 10 segundos aproximadamente por lo que de esta forma se valido el diseño de las rutinas de movimiento en Ladder, ya que cumplía con los tiempos establecidos por los perfiles de movimiento. Luego de este análisis inicial, se observo mas detalladamente el comportamiento de la maquina hasta el punto de poder verificar si cada uno de los ejes se movía en el orden establecido por el código de Ladder, donde nuevamente se encontró una respuesta positiva al respecto.

4. Reporte de proceso

4.1. Gestión de proyecto

Debido los requerimientos computacionales de la maquina virtual, lo primero que se gestiono como grupo, fue cuales de los integrantes del grupo podrían instalar la maquina virtual en sus respectivos computadores, para de esta manera saber que recursos se tenían disponibles. Luego de definir esto, se instalo la maquina virtual en el computador de dos de los integrantes del grupo. Una vez se realizo lo anterior, se acordaron varias reuniones virtuales por 'Meet' con el fin de avanzar en distintos aspectos del proyecto simultáneamente y generando un espacio de retroalimentación y discusión dentro del grupo, gracias a eso los integrantes que no tuvieron la oportunidad de instalar la maquina virtual pudieron observar el proceso, evitando ser ajenos a las distintas herramientas usadas para esta simulación.

4.2. Trabajo colaborativo

A partir de los errores cometidos en el proyecto académico y el cambio en la metodología de trabajo, hubo mayor retroalimentación de las distintas tareas realizadas además de la revisión de cada una de ellas por un integrante del grupo diferente a quien debía realizarlas inicialmente. Finalmente, la distribución del trabajo quedo de la siguiente manera:

- Juan Barrera: Revisión del Ladder, validación perfiles de movimiento, revisión de simulación NX.



- Nicolás Prieto: Desarrollo de los perfiles de movimiento, simulación en NX, programación en Ladder, apoyo con la instalación de la maquina virtual.
- Andrés Sebastian Serna: Parametrización de las trayectorias, documentación detallada de las rutinas programadas, apoyo en la coordinación y comunicación entre los diferentes componentes del proyecto.
- Juan Pablo Ortiz: Desarrollo del esquema de automatización Grafset, Revision arquitectura de comunicaciones, apoyo manejo Studio5000

4.3. Proceso de aprendizaje

- Juan Barrera: Durante el proyecto pude aprender como la comunicación dentro de un grupo de trabajo repercute de gran manera en los resultados del trabajo, igualmente aprendí que si previamente se tenia un esquema de trabajo el cual no era el adecuado para cumplir los objetivos de un proyecto es mejor cambiar ese esquema de trabajo y buscar uno que permita al grupo salir adelante.
- Nicolás Prieto: A partir de los fallos del proyecto académico se tomaron la lecciones aprendidas y se aplicaron para la organización del proyecto industrial. Las mejoras en la comunicación demostraron valiosas, haciendo que al final del plazo no se estuviera apresurados con esto. A nivel académico aprendí del manejo de las maquinas virtuales y de la programación en ladder junto con la simulación en el gemelo digital.
- Juan Pablo Ortiz: Con las lecciones aprendidas del proyecto anterior se mejoro la comunicación y la disposición del tiempo dentro del grupo, también se gestiono mejor el manejo de recursos técnicos. Desde la parte académico técnica comprendí mejor el uso de funciones especiales como el MAJ y demás que reducen la cantidad de código ladder, además de la metodología paso a paso y Grafset para gestionar eficazmente la programación de automatización.
- Andrés Sebastian Serna: Desde mi participación en el proyecto, he aprendido la importancia de la flexibilidad y adaptabilidad en un entorno de trabajo colaborativo. Observando los comentarios de mis compañeros, he comprendido que la comunicación efectiva y la disposición para ajustar estrategias son esenciales para superar los desafíos. Además, he adquirido conocimientos específicos en la parametrización de trayectorias y la documentación detallada, aspectos cruciales que impactan directamente en la calidad de los resultados finales.

4.4. Recomendaciones

- Juan Barrera: Al igual que en el proyecto académico, en este momento sigo insistiendo que la mejor recomendación que puedo dar, es la comunicación entre los miembros del grupo ya que esto permite enfocarse en buscar soluciones para los distintos contratiempos que se presenten.
- Nicolás Prieto: A partir del proyecto industrial recomendaría la comunicación del grupo, ya que por limitaciones económicas es imposible que todos los integrantes puedan instalar el entorno para el trabajo, lo que hace que la división de las tareas tenga que ser bastante mas clara.
- Juan Pablo Ortiz: Gestionar mejor los espacios y tiempos de trabajo, debido a que no se trabajo en lugares de condiciones optimas, tambien
- Andrés Sebastian Serna: Establecer una comunicación transparente y regular entre los miembros del equipo. Ser flexible y adaptarse a metodologías alternativas si la inicial no es efectiva. Fomentar una cultura de aprendizaje continuo, documentar exhaustivamente cada fase del proyecto y distribuir equitativamente las tareas. Utilizar herramientas de colaboración y realizar una planificación rigurosa de pruebas para identificar y abordar problemas de manera proactiva.



5. Análisis de resultados

El análisis de resultados revela el éxito en el desarrollo del proyecto de ingeniería enfocado en la programación de control de movimiento para una máquina con tres grados de libertad en los ejes X, Y y Z. El objetivo principal de parametrizar, programar y validar rutinas de control se ha cumplido de manera satisfactoria.

La parametrización de las trayectorias se llevó a cabo considerando la velocidad de trabajo de 5 cajas por minuto, estableciendo un tiempo de ciclo de 10 segundos y un semi-ciclo de 5 segundos para proporcionar un margen adecuado. La ecuación clave (Ec. 1) utilizada para calcular la aceleración mínima se basa en la relación entre el tiempo de ciclo y la longitud de la trayectoria.

La aceleración mínima resultante para el primer perfil Y, que recorre 3 metros en 5 segundos, así como para los perfiles X y Z que comparten aceleración al recorrer $\pi/2$ radianes en 2.5 segundos, fue calculada y posteriormente se aplicó un incremento del 25 % para asegurar un margen de seguridad. Esto resultó en aceleraciones de 0.6 m/s^2 para el eje Y y 1.25 rad/s^2 para los ejes X y Z.

La determinación de las velocidades máximas (Ec. 2) se realizó considerando las aceleraciones previamente calculadas. Las velocidades máximas resultantes fueron de 0.8291 m/s para el eje Y y 0.8711 rad/s para los ejes X y Z. Estos cálculos aseguraron un movimiento controlado y eficiente, manteniendo un margen de seguridad.

Además, para el retorno a la posición inicial, se emplearon los mismos perfiles de movimiento que en la rutina de avance, garantizando consistencia en el comportamiento de la máquina en ambas direcciones.

La metodología adoptada, basada en el uso del lenguaje Ladder y la aplicación de instrucciones de bloques de movimiento especializadas, ha demostrado ser eficiente y robusta. Este enfoque ha facilitado la creación de rutinas que garantizan un control óptimo de los movimientos industriales necesarios.

La validación del sistema se llevó a cabo mediante el monitoreo de tendencias proporcionadas por el software Studio 5000, que ofreció perfiles detallados de movimiento para los ejes X, Y y Z. Además, se utilizó un gemelo digital de la máquina para pruebas en el software Siemens NX, asegurando la precisión y fiabilidad del control implementado.

En cuanto a los objetivos específicos del proyecto, se logró la configuración de parámetros para cada eje de la máquina, estableciendo características específicas de movimiento. La programación de rutinas en lenguaje Ladder se realizó con éxito, y el uso del software Studio 5000 permitió monitorear y analizar las tendencias de movimiento, asegurando coherencia y precisión.

Las pruebas en el gemelo digital de la máquina en el entorno Siemens NX validaron el correcto funcionamiento del sistema en un contexto simulado. Además, se identificaron posibles mejoras en las rutinas de control mediante análisis de rendimiento y eficiencia, y se realizaron ajustes para lograr un movimiento más fluido y una respuesta más rápida de la maquinaria.

El informe técnico detalla la parametrización de la trayectoria, donde se calculó la aceleración mínima y las velocidades máximas para cada eje, asegurando un margen de seguridad del 25 %. El diseño de rutinas se basó en gran parte en el código existente en Ladder, con enfoque en las rutinas de control de movimiento.

La validación de perfiles de movimiento se realizó con éxito utilizando el software Studio 5000 y la herramienta 'trends', demostrando el comportamiento trapezoidal de los perfiles y cumpliendo con los requisitos de producción. La validación de rutinas de movimiento se llevó a cabo utilizando Siemens NX



y el gemelo digital de la máquina, confirmando la correcta definición de las rutinas en el código Ladder.

6. Conclusiones

Se considera que la programación de control de movimiento para una máquina con tres grados de libertad en los ejes X, Y y Z ha revelado logros significativos. Las conclusiones del proyecto son las siguientes:

- **Realización de Objetivos:** El proyecto ha alcanzado con éxito los objetivos establecidos, desde la configuración de parámetros hasta la validación de rutinas de control en un entorno simulado. La implementación de un sistema de programación en lenguaje Ladder ha demostrado ser eficiente y confiable.
- **Eficiencia en la Parametrización de Trayectorias:** La parametrización cuidadosa de las trayectorias ha sido esencial para garantizar un movimiento fluido y controlado de la maquinaria. El análisis detallado de aceleraciones y velocidades máximas, considerando también el espacio recorrido, ha contribuido a la optimización del rendimiento.
- **Validación Rigurosa:** La validación del sistema a través del monitoreo de tendencias en el software Studio 5000 y las pruebas en el gemelo digital en Siemens NX ha confirmado la coherencia y precisión de las rutinas programadas.
- **Versatilidad del Enfoque Ladder:** La elección del lenguaje Ladder para la programación ha demostrado ser acertada, facilitando la creación de rutinas eficientes y robustas. La adaptabilidad de este enfoque ha permitido una integración suave de las trayectorias parametrizadas dentro del código existente.
- **Lecciones Aprendidas:** A lo largo del proyecto, se han identificado y abordado posibles mejoras en las rutinas de control, destacando la importancia de un análisis continuo de rendimiento y eficiencia.
- **Contribución a la Clase de Servomecanismos:** El éxito del proyecto ha demostrado la aplicabilidad de los conocimientos adquiridos en la clase de Servomecanismos. La capacidad para traducir la teoría en soluciones prácticas refuerza la efectividad de la formación recibida.