



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Energía y Ambiente

**ESTUDIO TÉCNICO DE ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE
DISPOSITIVOS DE MOVIMIENTO INTELIGENTE PARA MEJORAR LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN UNA IMPRESORA FLEXOGRÁFICA**

Ing. Edinson Hernández Barillas
Asesorado por el Mtro. Ing. Saúl Cabezas Durán

Guatemala, mayo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO TÉCNICO DE ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE
DISPOSITIVOS DE MOVIMIENTO INTELIGENTE PARA MEJORAR LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN UNA IMPRESORA FLEXOGRÁFICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. EDINSON HERNÁNDEZ BARILLAS

ASESORADO POR EL MTRO. ING. SAÚL CABEZAS DURÁN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, MAYO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Alvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Cesar Ariel Villela Rodas
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO TÉCNICO DE ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE DISPOSITIVOS DE MOVIMIENTO INTELIGENTE PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA IMPRESORA FLEXOGRÁFICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 29 de noviembre de 2020.

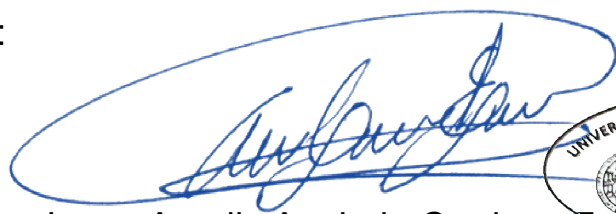
Ing. Edinson Hernández Barillas

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.381.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO TÉCNICO DE ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE DISPOSITIVOS DE MOVIMIENTO INTELIGENTE PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA IMPRESORA FLEXOGRÁFICA**, presentado por: **Edinson Hernández Barillas**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Energía y ambiente después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, mayo de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, mayo de 2022

LNG.EEP.OI.381.2022

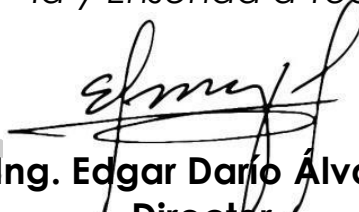
En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“ESTUDIO TÉCNICO DE ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE DISPOSITIVOS DE MOVIMIENTO INTELIGENTE PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA IMPRESORA FLEXOGRÁFICA”

presentado por **Edinson Hernández Barillas** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Energía y ambiente** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Colí
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**





Guatemala, 16 de octubre 2021

Como coordinador de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"ESTUDIO TÉCNICO DE ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE DISPOSITIVOS DE MOVIMIENTO INTELIGENTE PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA IMPRESORA FLEXOGRÁFICA"** presentado por el ingeniero **Edinson Hernández Barillas** quien se identifica con carné **201313731**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 09 octubre 2021.

**Ingeniero M.Sc.
Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12**

Distinguido Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor del trabajo de graduación del estudiante Edinson Hernández Barillas, Carné número 201313731, cuyo título es "**ESTUDIO TÉCNICO DE ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE DISPOSITIVOS DE MOVIMIENTO INTELIGENTE PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA IMPRESORA FLEXOGRÁFICA**", para optar al grado académico de Maestro en Energía y Ambiente, he procedido a la revisión del INFORME FINAL y del ARTÍCULO.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante Hernández Barillas, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



SAUL CABEZAS DURÁN
Ingeniero Electricista / Colegiado 4648
Maestro en Administración de Empresas

Ing. Saúl Cabezas Durán.

MBA—Maestro en Administración de Empresas con Especialización en Productividad Total
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	¡A Él sea toda la Gloria y Honra! Todo se lo debo a Él.
Mis padres	Israel Hernández y María Susana Barillas. Por su amor y apoyo incondicional. Son mi mayor motivación. Los amo con todo mi corazón.
Mis hermanas	Lucía y Neili Hernández Barillas. Por su apoyo incondicional durante toda mi trayectoria. A quienes admiro por su dedicación y esmero en realizar todo de la mejor manera.
Mi esposa	María José Barrientos, mi compañera de vida, a quien amo con todo mi corazón y por su apoyo brindado para alcanzar cada meta propuesta. Gracias por ser un ejemplo a seguir.
Familia Contreras Solís	Ramón Contreras, Jackeline Solís y Jonathan Contreras, por su cariño y apoyo incondicional, siendo mi segunda familia.
Mi pastor	Jannsen Carrera, por su amistad y apoyo espiritual. Gracias por creer incondicionalmente en mi potencial. A quien admiro y respeto en todas las áreas de su vida.

Mis amigos

Roberto Estrada, Kevin y Luis Godoy Ramírez por ser parte de este logro y quienes han estado en los buenos y malos momentos. Se han convertido en parte de mi familia.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el lugar que me permitió cambiar mi futuro, brindándome los conocimientos necesarios para ser un profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme la oportunidad de forjar una profesión de manera responsable.
Grupo Polytec	Por brindarme la oportunidad de realizar el diseño de investigación dentro de sus instalaciones.
Mi asesor	MA. Ing. Saúl Cabezas Durán por haberme apoyado durante todo el trabajo del diseño de investigación.
Jefe de mantenimiento del Área de Impresión	Ing. Edy Ramiro Guerra Santiago por su ayuda incondicional en la ejecución del diseño de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes de la investigación	1
1.2. Impresión flexográfica.....	3
1.3. Tipos de impresoras	5
1.4. Ventajas de la impresión flexográfica	7
1.5. Tipos de tintas utilizadas	8
1.6. Eficiencia energética en impresoras flexográficas	10
1.6.1. Rendimiento.....	11
1.6.2. Calidad	12
1.7. Dispositivos de movimiento inteligente	14
1.7.1. Controladores de servomotores.....	14
1.7.2. Motores paso a paso	15
1.7.3. Variadores de frecuencia	19
1.8. Red de comunicación de datos	21
1.8.1. Red profibus	21
1.8.2. Control lógico programable.....	25

1.9.	Programación.....	29
1.9.1.	Entorno de programación Tia Portal.....	29
1.10.	Topología de redes de comunicación.....	31
1.10.1.	Definición.....	31
1.10.2.	Clasificación	32
1.10.2.1.	En bus	32
1.10.2.2.	En estrella	33
1.10.2.3.	En anillo.....	34
1.10.2.4.	En malla	35
1.10.2.5.	Híbrida.....	35
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	37
2.1.	Recolección de datos iniciales de operación.....	37
2.2.	Actualización de dispositivos.....	45
2.3.	Propuesta de estabilización del sistema	49
2.4.	Eficiencia energética de la impresora flexográfica	50
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	53
3.1.	Condiciones iniciales de operación	53
3.2.	Determinación del voltaje de comunicación	57
3.3.	Estabilización del sistema de comunicación	60
3.4.	Estimación del ahorro energético de la impresora flexográfica.....	63
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	67
	CONCLUSIONES.....	71
	RECOMENDACIONES	73
	REFERENCIAS	75

APÉNDICES	81
-----------------	----

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de impresión flexográfica	5
2.	Impresora flexográfica de tambor central	6
3.	Diagramas eléctricos de controladores Indramat	15
4.	Diagrama eléctrico de controladores de motores paso a paso	18
5.	Diagrama eléctrico de variadores Eurotherm	21
6.	Conexión del protocolo profibus.....	24
7.	Estructura del PLC	27
8.	Ejecución del PLC.....	28
9.	Creación de nuevo proyecto	29
10.	Configuración de dispositivos.....	30
11.	Configuración tipo Bus	33
12.	Configuración estrella.....	34
13.	Configuración en anillo.....	34
14.	Configuración en malla.....	35
15.	Analizador de redes Circutor e3.....	38
16.	Diagrama de conexión en trifásico	38
17.	Voltaje de fase a fase.....	39
18.	Armónicos en corriente	39
19.	Armónicos en voltaje	40
20.	Potencia activa	40
21.	Potencia inductiva	41
22.	Potencia capacitiva	41
23.	Flicker ponderado	42

24.	Profitrace	42
25.	Proficore	43
26.	Datos de la medición de la red profibus.....	43
27.	Voltajes en nodo	44
28.	Topología de la red en un punto de medición	44
29.	Medición de voltaje con Osciloscopio	45
30.	Medición de voltaje en un nodo esclavo	45
31.	Módulos de motor Stepper Siemens.....	46
32.	Módulo para Stepper Siemens	46
33.	Variadores de frecuencia	47
34.	Controladores de servomotores.....	47
35.	PLC SIEMENS esclavo.....	48
36.	Conector Profibus en mal estado en tarjeta de control	48
37.	Conector Profibus en mal estado en CPU	48
38.	Muestra de voltajes de comunicación actual	58
39.	Muestra de voltajes de comunicación actual	58
40.	Voltaje estabilizado de medición 1.....	59
41.	Voltaje estabilizado de medición 2.....	59
42.	Voltaje estabilizado de medición 3.....	60
43.	Configuración y parametrización de controladores	61
44.	Configuración de valores del sistema	61
45.	Configuración de los controladores de los servomotores	62
46.	Configuración de controladores a PLC	63

TABLAS

I.	Clasificación de eficiencia energética	13
II.	Armónico en corriente análisis estadístico	53
III.	Armónico en tensión análisis estadístico	54

IV.	Tensión fase a fase análisis estadístico	54
V.	Corriente	55
VI.	Potencia activa	55
VII.	Potencia inductiva	56
VIII.	Potencia aparente	56
IX.	TDH corriente	57
X.	TDH tensión	57
XI.	Datos de la producción actual	64
XII.	Inversión de la actualización.	64
XIII.	Datos de la producción proyectada	64
XIV.	Ahorro energético y monetario	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Ampere
PLC	Control lógico programable
THD	Distorsión armónica total
Hz	Hercio
kW	Kilovatio
kVA	Kilovoltio amperio
kVAr	Kilovoltio amperio reactivo
kV	Kilovoltio
MW	Mega vatio
MWh	Mega vatio hora
m	Metro
W	Vatio
V	Voltio

GLOSARIO

DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemán de Normalización)
Eurotherm	Es un proveedor de instrumentos de control y medición para los mercados industriales y de procesos.
G(s)	Identificación de la función de transferencia.
Impacto ambiental	Alteración positiva o negativa que se hace al ambiente. Indicador ambiental expresión numérica, registro o algún otro parámetro que la organización establezca, para verificar el cumplimiento progresivo de sus metas ambientales.
Información técnica	Información referida a los datos de fabricación, operación y repuestos de cada maquinaria o equipo.
ISO	Organización Internacional para la Estandarización.
Mantilla	Encargada de transmitir la imagen de tinta de la plancha al papel. Está constituida por dos o tres capas de tejidos dependiendo de la fabricación de la capa superficial, es de caucho y se usan otros tejidos como el algodón.

Mejora continua	Proceso cíclico de optimización de los procesos que realiza una organización. Consiste en planificar, hacer, verificar y actuar para mejorar el desempeño.
Modbus RTU	Derivado de la arquitectura maestro-esclavo, Es un protocolo ampliamente aceptado debido a su facilidad de uso y confiabilidad,
Negativos	Es una copia del arte. Tiene transparente las partes que se van a imprimir y negro las que no se utilizarán.
PID	Controlador Proporcional, Integral y Derivativo.
Placa	Lámina de aluminio presensibilizado con recubrimiento fotosensible, el revelador elimina el área de no imagen. Las placas son las transportadoras de imagen hacia la mantilla.
PLC	Control lógico programable.
Polímero	Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que constituyen enormes cadenas de las formas más diversas.
Profibus	Es un estándar de red digital de campo abierto (bus de campo) que se encarga de la comunicación entre los sensores de campo y el sistema de control o los controladores.

Profitrace

Es el más potente analizador móvil de redes Profibus.
Es una herramienta imprescindible para el
mantenimiento y la solución de problemas.

SynTop10

Estudio de Interacción y Diseño de Información.

RESUMEN

La investigación realizada tuvo por objetivo diseñar una propuesta de actualización del sistema de automatización de dispositivos de movimiento inteligente de una impresora flexográfica para aumentar la eficiencia energética actual. Se inició con el análisis de las condiciones iniciales de operación de la máquina para determinar el problema del sistema para después encontrar por medio de simulaciones dentro de la red profibus la estabilización del sistema logrando un ahorro significativo.

El estudio se realizó en una empresa dedicada a la elaboración de plástico flexible y específicamente se analizó el sistema de automatización y comunicación de una impresora flexográfica de marca Bielloni. Utilizando un analizador de redes Circutor se obtuvieron variables eléctricas y por medio de profitrace se adquirió el levantamiento de la red Profibus de la máquina. Con los valores iniciales se identificaron los problemas del sistema.

Para la propuesta de la actualización de los dispositivos de movimiento inteligente se derivó principalmente de que ya están obsoletos por el año de fabricación de la impresora flexográfica y la vida útil que garantizan los fabricantes de dispositivos electrónicos. Es necesario realizar el cambio de conectores profibus, variadores de frecuencia Eurotherm, controladores para Servomotores Indramat y módulos de control para los motores Stepper Siemens. Los dispositivos fueron buscados para un cambio directo, pero no se encontraron los modelos necesarios.

La estabilización del sistema de comunicación se logró por medio de obtener un valor óptimo de voltaje dentro de un rango de simulaciones que se realizaron. La simulación del voltaje se realizó luego de programar dentro del código principal de la impresora que los dispositivos se habían actualizado por nuevos modelos. Colocando *drivers* y valores promedio de dispositivos similares a los que indica la propuesta de cambio dentro del sistema de comunicación. Con la estabilización se estimó una mejora en la eficiencia energética del equipo obteniendo un ahorro económico para la operación.

Se logró estimar una mejora energética para la actualización de los dispositivos obsoletos que sería reducir en 0.61 W por cada metro lineal impreso. Lo cual estaría proyectando un nuevo consumo energético de 2.24 W por cada metro lineal impreso generando un ahorro económico mensual aproximado de Q 4,464.00. También se debe considerar el alto costo que generaría no realizar la actualización de equipos por el paro del equipo.

El estudio realizado de la actualización y cambio de 27 conectores Profibus, 12 variadores Eurotherm, 20 controladores Indramat y 24 módulos para los motores Stepper Siemens, demuestra que es factible la implementación para obtener una mejor eficiencia de operación y generar un ahorro energético mensual significativo para la eficiencia de la planta. El costo del proyecto es grande para una recuperación con base al ahorro mensual, pero al compararlo con el costo del equipo parado el retorno de la inversión es inmediata.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los requerimientos de la industria cada día son más exigentes y busca la optimización de los recursos. La baja eficiencia energética de una impresora flexográfica se refleja en el consumo elevado de energía eléctrica para producir la misma cantidad de metros impresos que otras impresoras. Actualmente la impresora tiene los indicadores más bajos del área, debido a que presenta el mayor costo por metro impreso, debido a la serie de problemas recurrentes y prolongados durante la operación.

La red de comunicación de datos frecuentemente deja de enviar y recibir las señales de voltajes, causando que no se ejecuten las secuencias correctas, provocando daños en sellos, ejes y tarjetas electrónicas de los dispositivos de movimiento inteligente. También presenta pérdida de solvente y tintas; debido a que las soluciones ya se encuentran realizadas y muchas veces los tiempos de reparación son extensos de hasta 120 horas.

La falta de soporte técnico es crítica, debido a que no se cuenta con respaldo de las configuraciones, *drivers*, claves, repuestos y programación. Actualmente se encuentran obsoletos los módulos de control de los motores Stepper Control Lógico Programable PLC Siemens serie 6ES7138-4D00-0AB0 (24 unidades), los variadores de frecuencia Eurotherm (12 unidades) y los controladores de los servomotores Indramat (20 unidades). Todos los dispositivos se encuentran conectados dentro de una red Profibus con muchos problemas de ruidos y conectores en mal estado, que causan un sistema fallido que constantemente da problemas.

Al momento que se tiene problemas con la comunicación, las consecuencias son grandes en temas de consumo energético y producción. Del sistema de comunicación de la impresora flexográfica en un inicio se tenía el respaldo y soporte *online* desde Brasil (procedencia de la impresora flexográfica) de las fallas y configuraciones. Pero por el deterioro de la tecnología y falta de soporte técnico se procedió a modificar el código principal, dando como resultado virus dentro del sistema que agrava más la situación, debido a que muchas veces se borra toda la programación del sistema en cualquier parte del proceso productivo de la impresora.

La red Profibus está mal diseñada por la distribución de nodos. Se tienen problemas con armónicos en tensión y corriente que están fuera del rango permisible del 5 % de *Total Harmonic Distortion* TDH. Lo que genera un consumo de energía adicional en los motores, por las pérdidas del efecto Joule ($I^2 \cdot R$) y a esto se le suma la baja eficiencia de fabricación de los motores.

La eficiencia energética de la impresora flexográfica, debe ser la consecuencia de las acciones a realizar dentro del sistema de impresión, para aumentar su rentabilidad. Por ello en el presente diseño se plantea la pregunta principal: ¿La actualización de los dispositivos de movimiento inteligente, pueden mejorar la eficiencia energética de la impresora flexográfica?

Esta pregunta principal se complementa con las respuestas a varias preguntas auxiliares:

- ¿Cuáles con las condiciones actuales de operación de la impresora flexográfica?

- ¿Cuáles son los voltajes de comunicación en el *software* de medición que logran la estabilización del sistema?
- ¿Cómo obtener la estabilización del sistema de comunicación?
- ¿Cuánto ahorro energético se obtendrá con esta actualización?

OBJETIVOS

General

Diseñar una propuesta de actualización del sistema de automatización de dispositivos de movimiento inteligente, que permitan mejorar la eficiencia energética en una impresora flexográfica en una empresa de plásticos flexibles.

Específicos

1. Analizar las condiciones iniciales de operación de la impresora flexográfica.
2. Determinar los voltajes de comunicación con el *software* de medición para lograr la estabilización del sistema.
3. Explicar cómo obtener la estabilización del sistema de comunicación.
4. Estimar el ahorro energético de la impresora flexográfica con esta actualización.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El presente estudio es del tipo cuantitativo descriptivo. La información necesaria para la investigación se obtuvo de los datos históricos de eficiencia productiva de la impresora flexográfica analizada durante 12 meses, los valores de eficiencia energética de los equipos instalados y de los valores iniciales de operación por medio de un analizador de redes Circutor, Proficore y profitrace.

Para el estado inicial de la red de comunicación de datos Profibus se utilizó el programa Profitrace interconectado por el *hardware* Proficore al Control Lógico Programable PLC de la impresora ubicado en el panel de control. El sistema necesitó 05 horas en realizar el muestreo de toda la red Profibus de la impresora flexográfica.

La información obtenida se interpretó por separado. Para la eficiencia de producción de la impresora, se validaron los datos productivos de fábrica para comparar con la producción actual. Con la eficiencia de los equipos se realizó una gráfica del tiempo en años comparado con el avance de la eficiencia energética de los equipos y con los valores iniciales de operación del equipo se interpretó cada gráfica y tabla presentada en la investigación.

La estabilización del sistema no se restringió a una estructura debido a las variantes que se tuvieron al momento de simular la programación de los nuevos dispositivos de movimiento inteligente sobre el código principal. Se necesitaron varias configuraciones adicionales e instalación de *drivers*, que aún siguen en función de la fecha en que se realice, porque las actualizaciones pueden variar por indicaciones de los fabricantes.

Para el ahorro energético se utilizó como base los valores iniciales de potencia activa de la impresora flexográfica para proyectar el ahorro energético de la actualización de los dispositivos de movimiento inteligente. Se realizó una tabla para comparar los valores de potencia y energía definiendo el ahorro energético proyectado. Luego se procedió a realizar un análisis financiero para medir la viabilidad del proyecto y el retorno de la inversión.

INTRODUCCIÓN

Los requerimientos de la industria cada día son más exigentes y busca la optimización de los recursos. La baja eficiencia energética de una impresora flexográfica se refleja en el consumo elevado de energía eléctrica para producir la misma cantidad de metros impresos que otras impresoras. La red de comunicación de datos frecuentemente deja de enviar y recibir las señales de voltajes, causando que no se ejecuten las secuencias correctas. La falta de soporte técnico es crítica, debido a que no se cuenta con respaldo de las configuraciones, *drivers*, claves, repuestos y programación. Lo cual genera muchas pérdidas económicas por los paros prolongados y no programados.

El diseño del estudio técnico de actualización del sistema de automatización de dispositivos de movimiento inteligente permite estimar una mejora energética en el consumo actual de la impresora flexográfica y genera un ahorro económico mensual considerable para la eficiencia de la planta. El proyecto se debe de realizar lo antes posible debido a que los dispositivos se encuentran obsoletos en el mercado y el no realizar la actualización genera paros más prolongados por reparaciones hasta llegar a un punto crítico que significaría el paro de la máquina generando grandes pérdidas para la empresa.

El método aplicado fue del tipo cuantitativo descriptivo, donde se evaluaron los valores iniciales de operación del sistema de comunicación y consumo de la máquina. Permitiendo obtener de manera inmediata la raíz del problema del sistema de comunicación por medio del levantamiento de la red Profibus realizada con el programa Profitrace. Indicando la criticidad en los distintos puntos de la topología del sistema. El proyecto inició con la revisión bibliográfica,

la recopilación de los valores iniciales de operación del sistema, simulación del voltaje de comunicación adecuado, la estabilización del sistema y una estimación de la mejora de la eficiencia energética y ahorro económico del nuevo sistema.

La estabilización del sistema se logró por medio de un voltaje óptimo simulado por medio de Profitrace y con la actualización de los dispositivos de movimiento inteligente se logró una mejora en la eficiencia energética de la impresora flexográfica y un ahorro económico por el nuevo costo en W por cada metro lineal impreso.

En el capítulo 1 se incluyen los antecedentes de la investigación y una revisión bibliográfica enfocada principalmente en las características de cada dispositivo de movimiento inteligente. Cada impresora utiliza un diseño único dentro del sistema de comunicación y cantidad de dispositivos, por lo que se enfatizó en los distintos tipos de comunicación y partes de una impresora flexográfica.

En el capítulo 2 se realizó el desarrollo de la investigación que inició con un importante levantamiento de las condiciones iniciales de operación del consumo de la impresora como también del funcionamiento de toda la red Profibus. Con el sistema de la red se simuló el voltaje óptimo para lograr la estabilización del sistema y poder estimar la mejora de la eficiencia energética y ahorro económico esperado con la implementación.

Se concluyó que la implementación del diseño de actualización de dispositivos de movimiento inteligente se adapta a las condiciones actuales de la impresora y es completamente necesario realizarlo para obtener beneficios de ahorro energético y económico, El riesgo de no realizarlo con el tiempo se volvería un problema crítico que podría ser el paro definitivo de la máquina. El

tiempo para realizar la actualización debe ser no menor a 21 días por lo cual se debe programar junto con el departamento de producción y planificación. También es necesario instalar filtros para armónicos y reguladores de voltaje.

1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta el apoyo bibliográfico de investigaciones realizadas por otras personas de temas en común para el desarrollo del trabajo de investigación.

1.1. Antecedentes de la investigación

La actualización de los sistemas de automatización es una práctica muy frecuente en las industrias de Guatemala, debido a que muchas de las máquinas para su operación utilizan equipos electrónicos obsoletos.

En Guatemala no se encontraron estudios sobre actualizaciones de dispositivos de movimiento inteligente, por tal motivo se presentan a continuación estudios que se han realizado en otros países.

En la publicación de González y Villamizar (2019), Implementación de un sistema de control para regular la velocidad y posición de motores industriales utilizando el protocolo de comunicación *Open Protocol Communication* OPC, proponen crear un modelo matemático para el proceso a implementar por medio de Identificación de la Función de Transferencia $G(s)$ y obtener un Controlador Proporcional, Integral y Derivativo PID. Las conclusiones a las que llegaron son, que para las funciones de transferencia la variable a manipular debe ser la frecuencia debido a que se puede programar en los variadores de frecuencia y la variable a medir debe ser la velocidad de los ejes. Además, proponen utilizar la técnica de ubicación de polos y ceros para el diseño de los controladores.

En la publicación de Cevallos y Mesías (2019), Análisis de los efectos que causan los armónicos en los motores a inducción cuando usan los variadores de frecuencia, proponen distintas reglas para el esbozo de sistemas eléctricos libres de emisiones de armónicos para obtener un medio de comunicación eficiente. La recomendación fue que por el tipo de sistema de control que se trabaja se debe aplicar la norma Instituto de Ingenieros en Eléctrica y Electrónica o *Institute of Electrical and Electronic Engineers* IEEE 519-2014, la cual no da metas para equipos individuales, además proporciona las demarcaciones de desviación de tensión armónica para subyugar efectos dañinos con el equipo del interesado y del sistema.

En la publicación de Meza y Sabogal (2018), Análisis de metodologías para la cuantificación de pérdidas económicas por presencia de armónicos eléctricos y ocurrencia de SAGS de tensión, proponen el método *Wang, Chen y Lie* en un enfoque sistemático para evaluar los impactos técnicos y económicos por perturbaciones en la red de tensión. También es utilizado para evaluar distintas opciones de preparación de la calidad de energía.

En la publicación de Yumbla y Landivar (2017), Configuración y Programación del PLC S7-1200 en comunicación Profibus con el *unidrive* SP para uso Industrial, proponen configurar el PLC como controlador y maestro de la red Profibus para cumplir con la función de controlador de los servomotores de Corriente Alterna AC, mediante un respectivo drive de potencia. Para la comunicación Profibus con el Control Lógico Programable PLC se necesita el módulo de expansión Controlador Modular CM, 1243-5, el cual operará como maestro de la red Profibus. Las conclusiones a las que llegaron son que para la configuración del módulo CM 1243-5 y el PLC se debe utilizar el *software* Tia Portal y que solo es posible configurar como máximo 3 módulos CM por estación

y para configurar los dispositivos Siemens es necesario descargar los archivos *General Station Description* GSD de la página web del fabricante.

En la publicación de Pincolini (2017), Recomendaciones para el Ahorro de Energía en Motores Eléctricos, se propone elegir correctamente la potencia del motor, el ciclo del motor, la velocidad del motor, motores síncronos. Se concluye que el rendimiento máximo de un motor se encuentra entre el 75 y el 95 % de su potencia nominal y utilizar motores inducción trifásicos en lugar de monofásicos se obtendrá una eficiencia entre el 3 al 5 %.

En la publicación de Betancour (2016), Sistema de control de velocidad de un motor trifásico mediante un variador de frecuencia y sistema Scada, se propone realizar la comunicación por medio de un protocolo Modbus para tener una comunicación abierta entre el maestro y esclavo entre los dispositivos conectados en diferentes tipos de bus o red. Concluye que para la codificación Modbus *Remote Terminal Unit* RTU para cada *byte* se debe enviar como cadena de 8 caracteres binarios enmarcados con un bit de inicio. Por lo tanto, para cada *byte* puede tenerse hasta 11 *bits*.

1.2. Impresión flexográfica

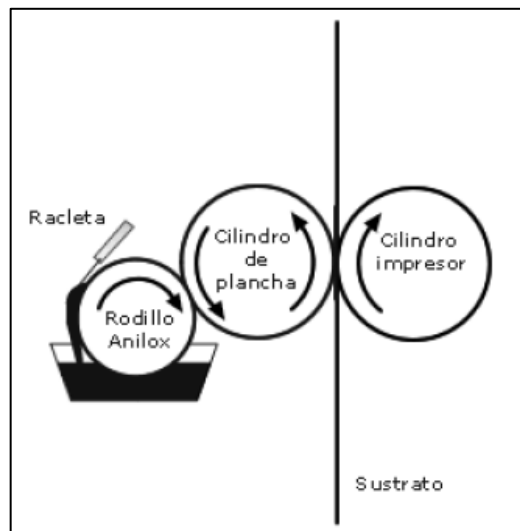
Comenta Benedicto (2016), que la impresión por medio de la flexografía es un sistema de impresión que trabaja de forma directa, mediante el uso de planchas que tienen estructuras flexibles grabadas en materiales con relieve, para este proceso se utilizan máquinas con funciones rotacionales y sistemas de tintas en estado líquido que tienen un secado de poco tiempo.

En la actualidad la industria se dedica a imprimir con tintas a base de solvente sobre la superficie de la capa de una película. Obteniendo figuras de un

solo color que generalmente es todo tipo de texto o logos, pero también se pueden obtener impresiones de fotografías de hasta ocho colores en alta calidad y definición. La película impresa tiene un lugar muy importante en los empaques de los alimentos, siendo una parte muy importante el empaque de los alimentos que se venden.

- En su tesis, Abril (2019), comenta: Tambor central: área circular para grabar con doble pared que es retocada, con una atención de plasma de cromo y níquel diligente a una temperatura (1500 grados C), este fortifica la superficie y la resguarda del desgaste. Tiene un circuito interno con agua tratada, glicol entre 20 y 30 % a presión de 1 bar +/- 0.1, y temperatura de 30 grados C +/- 0.5.
- Embobinador: envuelve el producto requerido de forma que se solicite.
- Anilox: gradúa la cantidad de tinta a trasladar a la plancha, para editar. Es un cilindro grabado con celdas que acumulan la tinta, estancan la tinta por absorción y tensión superficial. En correspondencia a su tamaño y profundidad acrecienta el porte de entintado. Los tres parámetros que posee anilox son la lineatura, el volumen y la angulación.
- Cilindro porta-planchas: cilindro metálico que doma la forma flexible, la cual se incrusta a su alrededor con cinta adhesiva. Acarrea al material las especialidades del diseño de ese color.
- Cilindro impresor: cilindro con caparazón de caucho duro. Su función es amparar el material a imprimir con la plancha o cliché.

Figura 1. **Esquema de impresión flexográfica**



Fuente: Benedicto (2016). *Plan de mantenimiento de una máquina flexográfica de 8 colores de tambor central*. Consultado el 10 de octubre de 2020. Recuperado de <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/5574/pfc6377.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

1.3. Tipos de impresoras

Benedicto (2016), hace una descripción de los diferentes tipos de impresoras empleadas en las industrias de litografía y empaques flexibles, las cuales son automatizadas por sistemas de manejo por medio de ordenadores.

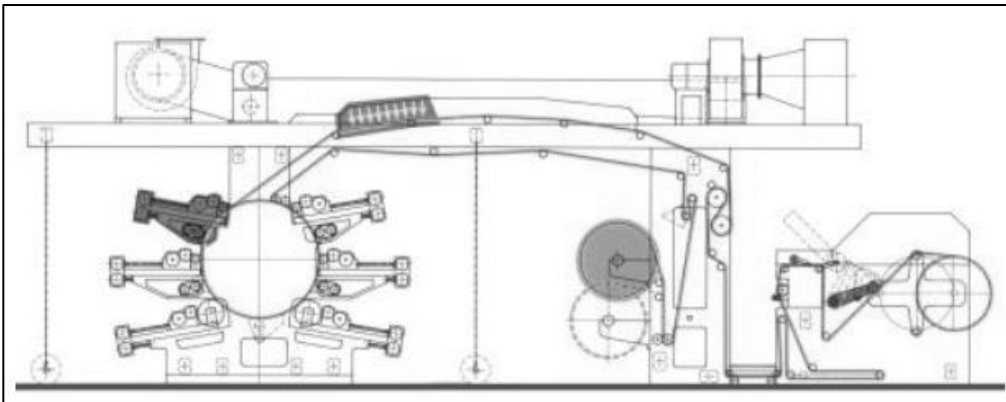
- **Impresora en torreta:** en la impresora convencional los depósitos de color están arriba, uno o uno y otro lado de la prensa. Cada estación de color es inducida por engranajes sobrellevados en la estructura de la prensa. Las prensas convencionales se elaboran desde uno hasta ocho depósitos de color, lo habitual es de seis colores.

- Impresora de tambor central: Tiene como principal característica una estructura muy rígida donde se ubican los grupos de impresión que son colocados. Tanto del lado derecho como izquierdo de un cilindro central, que realiza la contrapresión para generar las impresiones.

Iriarte (2017), comenta lo siguiente:

- Impresora en línea: Para este tipo de impresora los depósitos de color son separadas, acomodadas horizontalmente e inducidas por un eje de transmisión común. Las prensas en trazo puede haber cualquier número de colores y planteadas para manejar rollos anchos, dado que no se precisa una sola estructura soporte todos los depósitos de color. Se emplean en impresión de cajas plegadizas, corrugados, bolsas de pared, entre otros.

Figura 2. **Impresora flexográfica de tambor central**



Fuente: Benedicto (2016). *Plan de mantenimiento de una máquina flexográfica de 8 colores de tambor central*. Consultado el 10 de octubre de 2020. Recuperado de <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/5574/pfc6377.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

1.4. Ventajas de la impresión flexográfica

Menciona Abril (2019) que, al utilizar la técnica de impresión flexográfica, se reduce el tiempo de producir un orden de servicio, para lo cual se describen las ventajas que se tienen en la industria para mejorar la productividad.

- La plancha puede ser de material de fotopolímero o caucho. Teniendo la ventaja que la producción puede ser constante.
- El tambor central permite hasta un máximo de impresión de 10 colores para un mismo diseño, dando como resultado una inimaginable posibilidad de combinaciones de colores.
- Dependiendo de los requerimientos de los clientes, la impresión se puede realizar sobre películas no absorbentes y absorbentes.
- Se puede imprimir varias bobinas de películas, debido a los sistemas automáticos que se incluyen dentro del desbobinador y bobinador.
- Se pretende satisfacer los distintos requerimientos de los clientes, ofreciendo una amplia gama de tamaños de impresiones y colores.
- Para la impresión son utilizadas las tintas de secado rápido que ofrecen corridas mucho más grandes en un tiempo reducido.
- Dependiendo del modelo se pueden realizar corridas de impresiones cortas con rentabilidad.

1.5. Tipos de tintas utilizadas

Sugiere Benedicto (2016), que en la industria flexográfica se utilizan diferentes tintas según el tipo de producto a realizar, de acuerdo con las especificaciones técnicas de cada empaque, para lo cual se describen las tintas empleadas.

- Tintas en base disolvente: están formadas por aditivos, resinas, disolventes y pigmentos de color. Para obtener la viscosidad adecuada en la tinta se emplean los disolventes para que la impresión sea la adecuada y estos pueden ser del tipo orgánica o de agua.

Las características que debe tener son las siguientes:

- En todo momento se debe disolver con las resinas sin ningún problema.
- La evaporación debe ser progresiva con el objetivo de que se seque sin causar problemas de rechazos.
- Ningún elemento mecánico de la impresora debe verse afectado.

Acuosa (2014) las características de las tintas acuosas son las siguientes:

- Las tintas en base acuosa están formada por aditivos, pigmentos de colores y resinas siendo su disolución en agua. Este tipo de tintas nace de la necesidad y responsabilidad ambiental de ya no tener emisiones de solventes en la atmósfera. Las investigaciones han desarrollado que no genera contaminación industrial.

- Tiempo largo del secado de las tintas, esto hace poco rentable la producción de la impresora.
- Se tiene una mayor viscosidad en la tinta y causa una mayor tensión en la película y forma espuma.
- Genera problemas con todos los utensilios que se usan para la impresión, debido a que se deben limpiar inmediatamente porque al secarse la tinta, la operación de limpieza se complica.

Benedicto (2016), las características de las tintas ultravioleta son las siguientes:

- Tintas Ultravioleta (UV): no utilizan disolventes evitando la emisión de gases a la atmósfera y presentan las siguientes características importantes.
 - Buena calidad en las impresiones y tiempos rápido de secado.
 - El secado es por proceso fotoquímico.
 - Presenta un tiempo largo para poder realizar la limpieza de hasta 24 horas después de haber utilizado los equipos, consiguiendo tiempo para realizar otras actividades durante el proceso de impresión.

1.6. Eficiencia energética en impresoras flexográficas

Penabad, Iznaga, Rodríguez y Cazañas, (2016), describen los elementos referentes a la eficiencia energética en impresoras flexográficas, tomando en cuenta los factores de riesgos y los paros no programados.

- Disponibilidad: se define como la habilidad de un equipo para cumplir con la función requerida, para lo cual fue construido en un tiempo determinado. Y la probabilidad que se mide, es que el equipo se encuentre en condiciones adecuadas para trabajar sin presentar algún tipo de falla durante el tiempo de operación requerido por la producción.

Define Acuosa (2014), la disponibilidad de la impresora flexográfica puede disminuir su eficiencia debido a demoras por la falta de material.

- Por averías: los fallos inesperados durante la operación del equipo o durante los mantenimientos preventivos, son los causantes de los tiempos perdidos. El indicador para esta falla empieza a contar al momento que no se puede operar la maquinaria por la detección de una falla técnica.
- Por esperas: el tiempo perdido por esperas puede derivarse de varios factores que deben analizar a detalle según sea conveniente. Puede tener lugar por la entrega a mantenimiento o después de un mantenimiento programado. También registra tiempos perdidos por parte de la operación como almuerzo, falta de material, de insumos, y de programación.

Ecuación de disponibilidad de un equipo:

$$Disponibilidad (\%) = \frac{Tiempo\ disponible - tiempo\ perdido}{Tiempo\ disponible} * 100 \quad Ec. 1$$

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

1.6.1. Rendimiento

Describe Acuosa (2014) el porcentaje de cumplimiento de objetivos y velocidades de la impresora. Realiza la comparación de la velocidad a la cual debería estar produciendo el equipo con la velocidad a la que trabaja normalmente. Y la diferencia se basa en las pérdidas por velocidad que se clasifican de la siguiente manera.

- Microparos: describe Benedicto (2016) que son causadas por factores internos y externos. Siendo generalmente problemas internos del equipo que traen como consecuencias; variaciones en las velocidades de trabajo, debido a los constantes arranques. Este tipo de fallas empiezan a empeorarse al tener equipos con tecnologías obsoletas que son muy sensibles en sus partes eléctricas y una pequeña variación en el proceso los sensores paran inmediatamente los equipos.
- Velocidad reducida: indica Villamar (2015), se debe a que el equipo cuenta con una velocidad teórica que generalmente se toma de los manuales de los equipos que describe un problema, porque ese dato de velocidad está sobre condiciones perfectas de operación. Y se compara con la velocidad práctica que generalmente está determinada de manera experimental por el departamento de mantenimiento.

Ecuación de rendimiento de un equipo:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Total kilos producidos}}{\text{Tiempo real de operación} \cdot \text{producción ideal.}} * 100 \quad \text{Ec. 2}$$

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

1.6.2. Calidad

Sugieren Penabad, Iznaga, Rodríguez y Cazañas (2016), la calidad de los productos forma un punto a mejorar en todas las maquinarias de producción, porque constantemente se fabrican productos que no cumplen con parámetros de calidad, que son establecidos por el cliente y el departamento de calidad. Teniendo perdidas por los motivos siguientes.

- Desperdicio: se define como los productos que están fuera de los parámetros previamente establecidos.
- Revisión: considera la evaluación de productos que no cumplieron con el 100 % de las especificaciones previamente trazadas, pero por medio de un reproceso que puede ser otra corrida para imprimir alguna parte o hablar directamente con el cliente para que realice pruebas y determine si el producto le funciona. Se recomienda que la revisión de productos no conformes no sea una práctica constante, debido a que los clientes en muchas ocasiones aceptan dicho error, pero de ser repetitivo buscan otro proveedor que esté comprometido con la calidad de los productos que ofrece.

Ecuación de calidad de un producto:

$$Calidad (\%) = \frac{Producción\ total - producción\ defectuosa}{Producción\ total} * 100 \quad Ec. 3$$

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Comenta Abril (2019), la eficiencia energética de una impresora flexográfica se puede obtener al relacionar las variables de recurso, utilidad y particularidad por medio del producto de sus porcentajes. Del resultado de la ecuación se derivan los respectivos planes de acción que buscan la eliminación de las distintas causas raíz que impiden que la producción de la máquina sea rentable.

Ecuación de eficiencia energética de una impresora flexográfica

$$Eficiencia\ energética = Disponibilidad (\%) * Rendimiento (\%) * Calidad (\%) \quad Ec. 4$$

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Tabla I. **Clasificación de eficiencia energética**

% de eficiencia	Competitividad	Comentarios
<65%	Inaceptable	Grandes pérdidas económicas
65<%<75	Regular	Aceptable, en mejora
75<%<85	Aceptable	Continuar con la mejora
85<%<95	Buena	Valores a nivel mundial
>95%	Excelente	Excelencia energética

Fuente: Iriarte (2015). *Aplicación del SMED para incrementar la productividad en el cambio de formato de la impresora flexográfica*. Consulta: 15 de octubre de 2020. Recuperado de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/25594/Iriarte_GJ.pdf?sequence=1&isAllo

wed=y

1.7. Dispositivos de movimiento inteligente

Se describe los dispositivos de movimiento inteligente, por medio de controladores de servomotor, motores paso a paso, entre otros. Utilizados en las industrias de empaques, litografía.

1.7.1. Controladores de servomotores

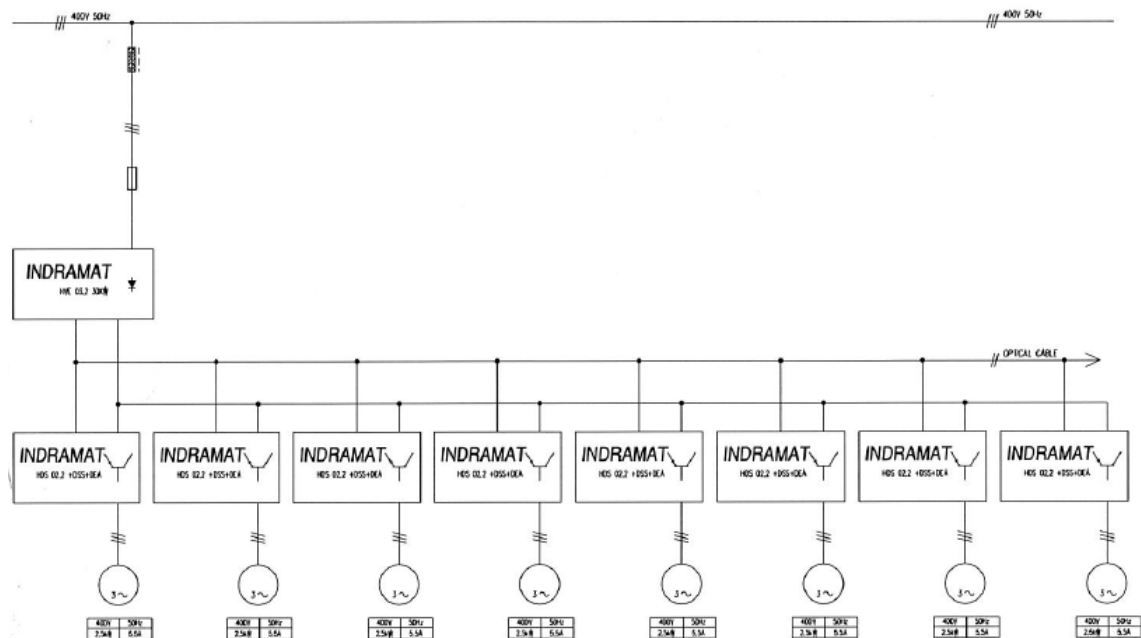
Mencionan Fernández, Contreras, Herrera y Oliveira (2017), todo servomotor se define como: un motor que sigue conservando el mismo concepto tradicional de convertir la energía eléctrica en mecánica, con la diferencia que produce un torque requerido para trasladar la fuerza a la posición programada o solicitada por el proceso productivo. Los que más demanda tienen en la industria, son de corriente alterna que tiene internamente un estator segmentado que produce una mayor potencia que los motores tradicionales sin considerar la precisión de los movimientos.

Indican Rodríguez y Fernández (2017) que un servomotor internamente tiene varios imanes permanentes, que tienen como función proporcionar mayor densidad de flujo, con el objetivo de mejorar el rendimiento del motor. Una de las principales ventajas de un servomotor, es que cada día se van mejorando los procesos y son más eficientes. Y es por eso que se redujo el tiempo de posicionamiento, debido a la disminución de la inercia por la mecánica del rotor. Esto ha revolucionado la industria obteniendo velocidades en el rotor de has 4,500 rpm.

- Agudelo (2016) se refiere a las principales características como:
 - Por elevado con una menor masa del motor.
 - Por su estructura, tienen bajo mantenimiento.

- Exactitud para controlar las variables de velocidad y posición.
- Se obtienen velocidades muy elevadas con la programación.
- Internamente las mermas en el rotor son pequeñas.
- Control total sobre la inercia en los motores.
- Tienen un índice de protección alto

Figura 3. Diagramas eléctricos de controladores Indramat



Fuente: Bielloni (2001). *Máquina flexográfica rollo a rollo.*

1.7.2. Motores paso a paso

Definen Jiménez y Arco (2016) como motores eléctricos que realizan movimiento teniendo como variable de control los pulsos enviados a través de una tarjeta de control. Estos dispositivos generalmente son utilizados a pequeñas y grandes escalas en las siguientes aplicaciones: impresoras de todo tipo,

alimentadores de papel, automatizaciones de todo tipo de movimiento rotacional y articulaciones de robots.

Comenta Rivera (2018) que la función primordial es fiscalizar todo tipo de sistema que requiera movimientos precisos y rotacionales. La tarjeta de control permite realizar algo muy característico en este tipo de motores, que el poder mover su eje con cada pulso que recibe, teniendo rangos desde 90 hasta 1.8 grados en función de la aplicación y programación realizada.

Otra de las características principales que sugieren Rodríguez y Fernández (2017) es tener la función de quedar enclavado o fijo en una posición previamente programada y no moverse hasta recibir un nuevo pulso con otra posible posición. También al momento de no recibir ningún tipo de pulso, el eje queda completamente libre a la espera de algún pulso para posicionarse dentro de lo programado.

- Se precisa las cuantificaciones básicas de un motor paso a paso:
 - Voltaje: representa la variable de voltaje que realiza el trabajo para este tipo de motor. Por lo habitual este valor de voltaje, viene impreso en la placa característica de todo motor y de no tener la placa, este valor se puede consultar en la ficha técnica del equipo. Dependiendo de la aplicación puede llegar a necesitar un voltaje por encima del nominal para vencer el reposo y la carga inicial en el eje, trayendo como problema el calentamiento y pérdidas por efecto Joule.
 - Resistencia eléctrica: los bobinados presentan como toda bobina una resistencia que se determina por Ley de Ohm, la corriente que

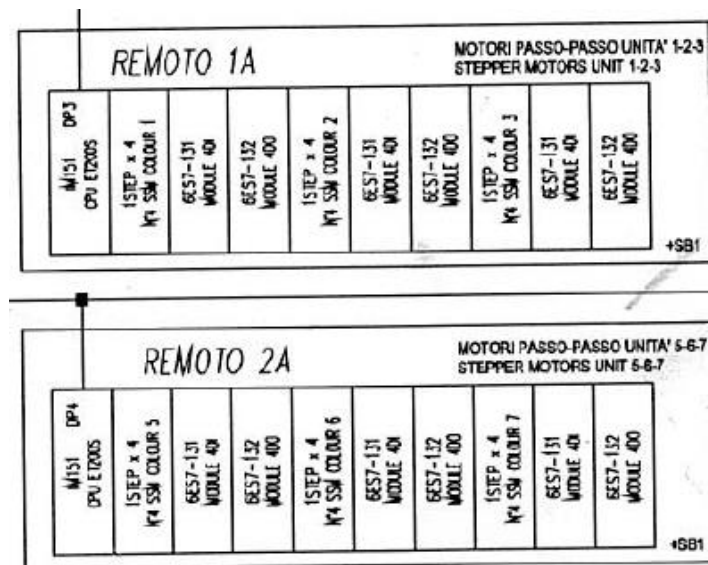
atraviesa el motor. La corriente en los bobinados determina el torque del motor de acuerdo a su respectiva curva para determinar su máxima eficiencia.

- Grados por paso: es la característica más importante a la hora de elegir un motor de este tipo, debido a que determina la aplicación que tendrá. Se detallan los grados que girará el eje para cada aplicación.
- Los motores paso a paso rigen su primicia de trabajo igual al de los motores de corriente continua, basando sus fuerzas que ejercen por el campo electromagnético que hace atravesar una corriente, pasando de las bobinas en el estator. Al momento de obtener una excitación en el estator, se forman los polos norte y sur, produciendo un campo magnético inconstante en el tiempo y la búsqueda del equilibrio magnético provocará un constante movimiento. Y esto se debe a que cuando los polos alcanzan el equilibrio magnético previsto.
- Aplicaciones de los motores paso a paso, Vivar y López (2013)
 - Impresoras
 - Robótica
 - Relojes eléctricos
 - Control remoto
 - Posicionamiento de piezas

- Ventajas:
 - Alta compatibilidad con todos los controladores
 - Los resultados son muy viables en circuitos de lazo abierto
 - Alta precisión de posicionamiento
 - Coste mantenimiento reducido
 - Circuitos sencillos

- Desventajas:
 - Generalmente por la falta de control se generan resonancias que pueden dañar los equipos.
 - Al estar trabajando a revoluciones altas los pasos se pierden, causando problemas con las secuencias

Figura 4. Diagrama eléctrico de controladores de motores paso a paso



Fuente: Bielloni (2001). *Máquina flexográfica rollo a rollo.*

1.7.3. Variadores de frecuencia

Comentan Flores y Dávila (2009), los variadores de frecuencia se definen como un dispositivo que ajusta su frecuencia, debido a que por medio del sistema electrónico interno tiene un control sobre la variable velocidad. Su objetivo principal, controla la variable presteza de un motor de CA por medio de la asiduidad del sistema.

La aplicación de los variadores es indefinida, que ha logrado que la industria sea tan eficiente y diversa como lo es hasta el día de hoy. El principio de controlar y programar la variable de la frecuencia hace de este dispositivo un excelente agente para los distintos proyectos.

En el análisis de los motores síncronos la velocidad se puede calcular de la siguiente manera:

Ecuación de velocidad síncrona:

$$N = \frac{120*f}{P} \quad \text{Ec. 5}$$

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Para un motor asíncrono se calcula de la siguiente manera:

Ecuación de velocidad asíncrona:

$$N = \frac{120*f*(1-s)}{P} \quad \text{Ec. 6}$$

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Donde:

N = velocidad mecánica

f = frecuencia de alimentación

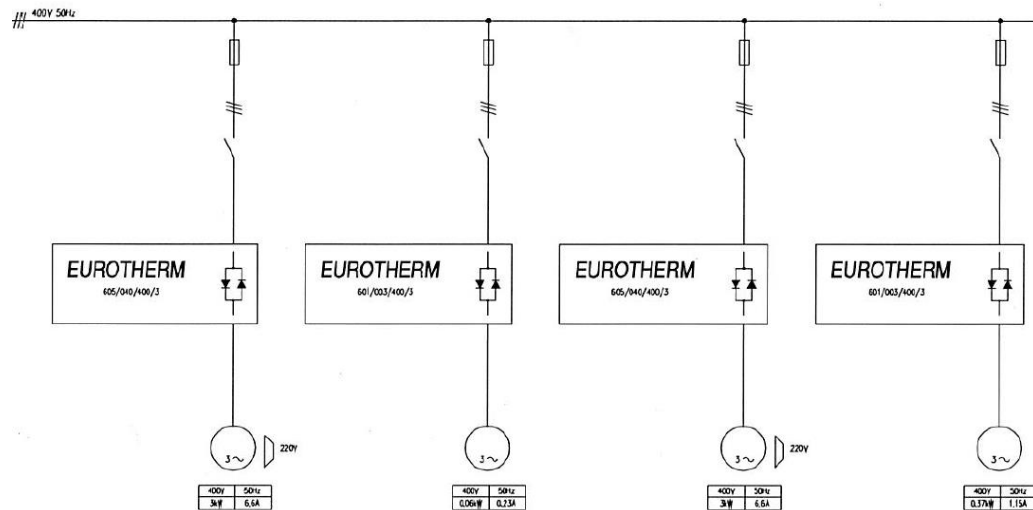
s = deslizamiento

P = número de polos

Al analizar las ecuaciones anteriores, se pueden observar que las variables de frecuencia y velocidad tiene una relación directa, que afecta a todo el sistema que al realizar un aumento de frecuencias genera, por lo consiguiente un aumento en la velocidad de giro del motor.

Y también al reducir de alguna manera la frecuencia la velocidad tiende a bajar de manera proporcional, aunque se debe considerar que el utilizar variadores aumenta los armónicos dentro de las redes eléctricas debido a la electrónica de potencias que utilizan sus circuitos eléctricos. Para elegir el variador que mejor supla las necesidades se debe enfocar en la potencia nominal de los dispositivos que controlará.

Figura 5. Diagrama eléctrico de variadores Eurotherm



Fuente: Bielloni (2001). *Máquina flexográfica rollo a rollo*.

1.8. Red de comunicación de datos

Se hace una descripción de los elementos de red de comunicación de datos, utilizados para el control de procesos de manufactura, que permiten llevar un registro de las operaciones de servicio y mantenimiento.

1.8.1. Red Profibus

Describen Fonseca y Játiva (2018). una red profibus se indica que es un protocolo normalizado en Comisión Eléctrica Internacional IEC 61158/61784, que es clasificado como uno de los sistemas más potentes en los bus del tipo campo por tener características de robustez y tiempos cortos de respuesta en señal. Un sistema con Profibus tiene una amplia gama de aplicaciones para la transmisión/recepción de datos, satisfaciendo los requerimientos de la industria.

Para todo proceso de automatización, son utilizados diferentes tipos de redes de comunicación que son muy específicos para cada aplicación y pueden ser sistemas muy complejos que necesitarán un mayor control o simplemente controlar una variable. Para funciones muy complejas, es necesario dividir el proceso dentro de las redes de comunicación para ir logrando los resultados por etapas y no pasar a la siguiente sin el cumplimiento de la anterior.

Sugiere Hurtado (2014), cuando los sistemas del control de la automatización son complejos, es necesario de crear un sistema que cumpla con las características de ser descentralizado para desarrollar sus funciones sin problemas. Durante mucho tiempo varios de los principales fabricantes de dispositivos automáticos, buscaban la descentralización de sistemas muy complejos. De dicha necesidad de la descentralización en 1991 regido por la Norma DIN 19245, se lleva a cabo la creación del sistema Profibus, siendo sus iniciales PRO = *process*; FI = *field*; BUS, cumpliendo con el objetivo específico de lograr la comunicación entre las redes de los dispositivos a automatizar de nivel de campo.

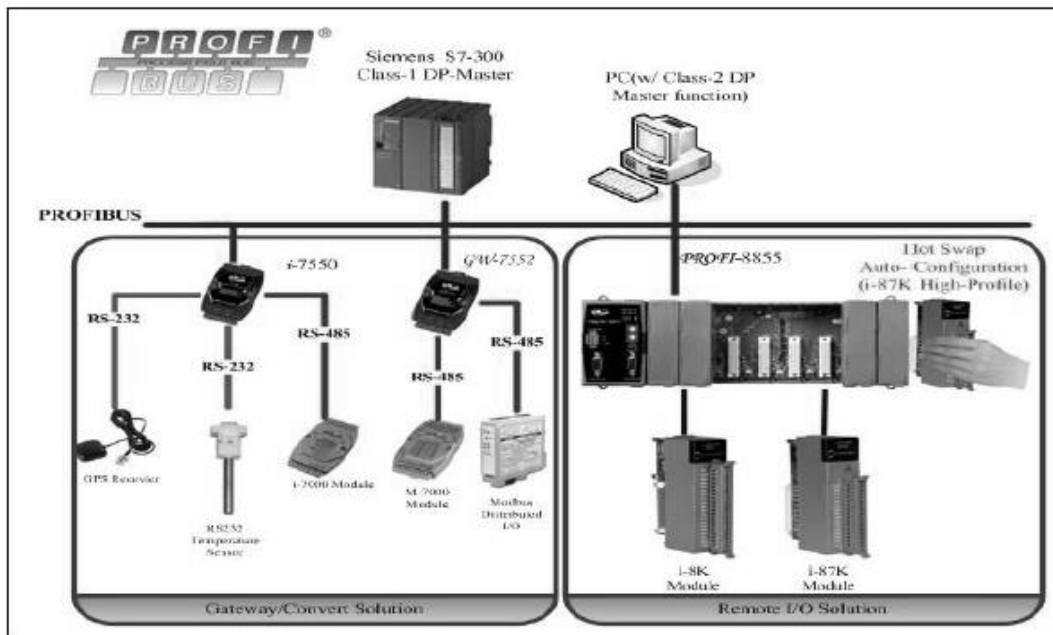
Sugieren Corzo y Rodríguez (2013) luego de la creación de la red Profibus, surge todo el complemento de dispositivos que se unirán dentro del sistema de automatización. Y se crearon dispositivos compatibles como: actuadores neumáticos, PLC, pantallas HMI, PC como entrada de variables, entre otros. Todos los dispositivos se conectan a través de un bus común que ha sido unificado logrando compartir toda la comunicación dentro de un solo canal recibiendo y enviando información del proceso.

Para lograr la comunicación Fonseca y Játiva (2018) dentro de la red Profibus, cada uno de los equipos deben cumplir ciertas características brindadas por los fabricantes y normas de comunicación. Actualmente se tienen problemas

entre la comunicación de protocolos, pero ya se está trabajando en la unificación de protocolos para lograr mayores aplicaciones en la industria y no depender de un solo fabricante. Aunque se tiene el conocimiento para llevar este proyecto a cabo, los intereses económicos de los fabricantes no han logrado la implementación en los diferentes sistemas de comunicación.

- Características de una red Profibus según Villacañas (2019):
 - Se caracteriza por ser una red de comunicación muy robusta de campo abierto, dentro de las funciones más solicitadas para este sistema son las respuestas de información en corto tiempo, seguras y sin interrupciones dentro de cualquier proceso del sistema.
 - Con sistemas complejos permite utilizar un sistema multi-maestro, que tiene como finalidad permitir operaciones conjuntas dentro del mismo sistema de automatización.
 - Cuenta con mucha flexibilidad y facilidad para realizar el montaje, operación y configuraciones.

Figura 6. **Conexión del protocolo Profibus**



Fuente: Villacañas (2014). *Integración de PLC con modelos virtuales de plantas industriales*. Consultado el 20 de octubre de 2020. Recuperado de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/30315#preview>

Para una red Profibus, es un sistema del tipo convencional se caracteriza por tener los Sistemas de Control Directo SCD, donde se tiene un control limitado de las tareas por ser céntrica y tiene la desventaja que los equipos se conectan y prueban uno a uno, limitando la cantidad de dispositivos y procesos automáticos a realizar.

En la industria actual los requerimientos cada día son más exigentes y los procesos industriales son cada día más complejo. Para suplir las exigencias, se necesitan conexiones y dispositivos más robustos para lograr cumplir y ejecutar los procesos programados. Por las exigencias de estos procesos los sistemas centralizados se dieron por ineficientes y se trasladaron a segundo plano,

creando en los nuevos sistemas una información que da una respuesta satisfactoria y confiable. El sistema Profibus Fonseca y Játiva (2018), se puede clasificar dentro de los protocolos industriales que buscan suplir la necesidad de obtener información en tiempo real.

- Ventajas de la red Profibus según Corzo y Rodríguez (2013):
 - Posee un sistema robusto y abierto.
 - Tiempos cortos en respuesta de información.
 - Se puede utilizar en múltiples topologías de red.
 - Fácil instalación, configuración y mantenimiento.
 - El sistema es muy seguro.
 - Información en tiempo real del nivel de campo.
 - Se puede expandir el sistema sin problema.
 - Los ruidos dentro del sistema son casi nulos.
 - No importa el proceso, la comunicación entre dispositivos es inmediata.

El sistema Profibus Fonseca y Játiva (2018) está orientado al modelo OSI, por tal motivo al referirse a la arquitectura de la red tiene como base las Normas Internacionales como la ISO 7498, donde se definen diversas características muy específicas del modelo OSI.

1.8.2. Control lógico programable

Define Balcells, Romeral y Martínez (1997) como un dispositivo electrónico y se abrevia PLC. Es el dispositivo encargado de ejecutar cada una de las líneas de programación e instrucciones del sistema retroalimentando el sistema a cada cierto tiempo. Este dispositivo electrónico cuenta con la capacidad de tener una

memoria programable en el sistema, dejando a la imaginación la cantidad de instrucciones que puede ejecutar. En todo proceso automático debe hacer como centro de control un PLC, de lo contrario las funciones, espacio y equipos son limitadas para los procesos.

La mayoría de estos controladores, son instalados en procesos industriales por las diversas funciones que realiza, el tiempo de respuesta en recibir/enviar la información es inmediata, logrando la eficiencia y productividad de los equipos que controla.

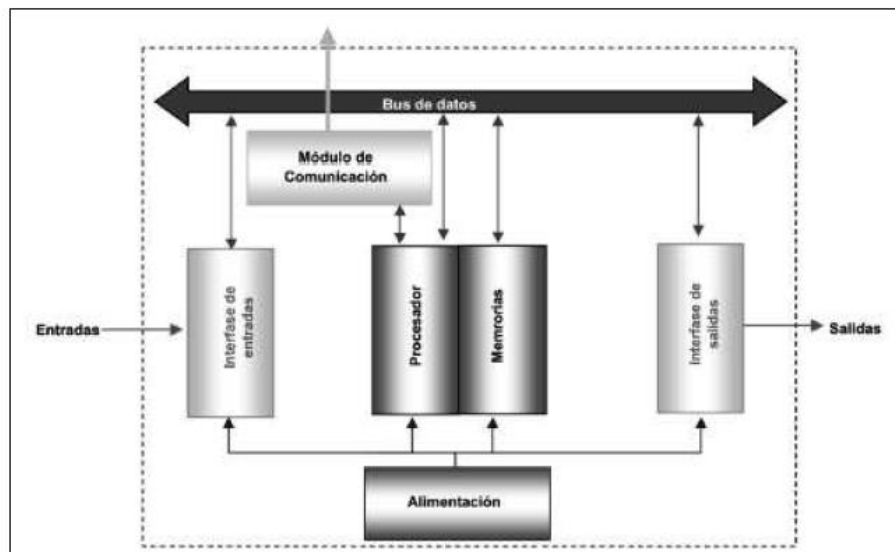
Sugiere Villacañas (2019), el PLC ha revolucionado las industrias en la actualidad, es un dispositivo con características que lo hacen especial por su extenso campo de aplicaciones y problemas que puede resolver. Por la complejidad del dispositivo existen continuamente actualizaciones en su *hardware* y *software* para optimizar el trabajo que realiza y suplir las necesidades de la industria.

- Aplicaciones de un PLC según Fonseca y Játiva (2018):
 - Instalación en paneles con reducido espacio.
 - Durante los procesos pueden cambiar en intervalos de tiempo.
 - Sistemas con procesos variables en todas las etapas.
 - Para usar en señalización y controlar procesos.
 - Se pueden controlar todo lo de seguridad dentro de la planta.
 - Instalaciones que demandan maniobras en tiempos específicos.
 - Para sistemas robustos y de gran escala.
 - Se puede programar de manera centralizada.
 - Maniobras para equipos que necesitan ser automatizadas

En cuanto a Yumba y Landivar (2017):

- Estructura de un PLC: todo controlador lógico programable se encuentra formado por una estructura básica cómo la que se detalla a continuación:
 - CPU
 - Memoria
 - Interfaz de entrada
 - Interfaz de salida
 - Alimentación
 - Módulos de comunicación

Figura 7. Estructura del PLC



Fuente: Yumba y Landivar (2017). *Configuración y Programación del PLC S7-1200 en comunicación PROFIBUS con el UNIDRIVE SP para uso Industrial.*

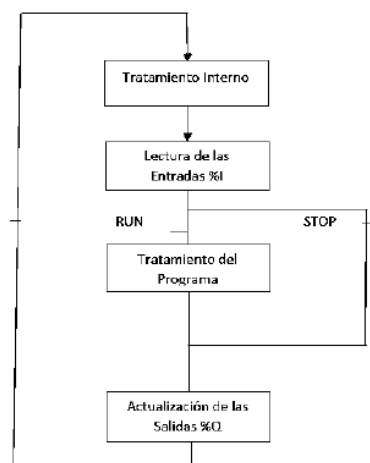
En su investigación Villacañas (2019) describe:

- **Funcionamiento del PLC:** la característica principal del funcionamiento del PLC es de forma cíclica y secuencial, dando como resultado operaciones continuas y repetidas a gran velocidad, que depende del tiempo de barrido que indica el lapso en que el PLC completa un ciclo.

A continuación, Balcells, Romeral y Martínez (1997) presentan la secuencia típica del barrido de un PLC:

- Autodiagnóstico
- Asimilación del reconocimiento de las variables de entradas
- Lectura y cumplimiento del programa PLC
- Curiosidad de las comunicaciones
- Reajuste del registro de egreso.

Figura 8. **Ejecución del PLC**



Fuente: Yamba y Landivar (2017). *Configuración y Programación del PLC S7-1200 en comunicación PROFIBUS con el UNIDRIVE SP para uso Industrial.*

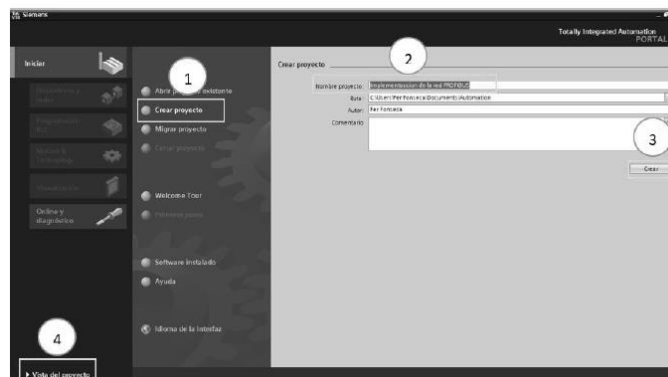
1.9. Programación

La programación se puede realizar por medio de Tia Portal que es una herramienta de fácil uso en las industrias de manufactura, en el siguiente apartado se presenta la descripción general.

1.9.1. Entorno de programación Tia Portal

Siemens brinda una herramienta única de su marca y el *software* Tia Portal, en el cual se pueden programar todas las distintas funciones que debe realizar el sistema programado proporcionando confiabilidad en la ejecución de todos los procesos requeridos proyectando una interfaz muy gráfica y amigable con los usuarios y teniendo la opción de cambiar la programación en el momento que se necesite.

Figura 9. Creación de nuevo proyecto



Fuente: Fonseca y Játiva (2018). *Implementación de una red Profibus para el control de una banda transportadora en el proceso de calentamiento y reactivación del pegamento en el caucho, mediante un sistema seguidor de temperatura y extracción de gases*. Consultado el 25 de octubre de 2020. Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/9210/1/108T0253.pdf>

Figura 10. **Configuración de dispositivos**



Fuente: Fonseca y Játiva (2018). *Implementación de una red Profibus para el control de una banda transportadora en el proceso de calentamiento y reactivación del pegamento en el caucho, mediante un sistema seguidor de temperatura y extracción de gases*. Consultado el 25 de octubre de 2020. Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/9210/1/108T0253.pdf>

Luego de haber creado el nuevo proyecto, se puede entrar a la visualización donde se encuentra el menú que tiene varias herramientas de ayuda, con el fin de añadir y configurar los distintos dispositivos electrónicos que se van a utilizar en el programa solicitado.

Menciona Balcells, Romeral y Martínez (1997), el PLC con el que se desea trabajar debe tener la capacidad de procesar un gran número de variables de entradas y salidas, como sea requerido por la aplicación. Teniendo en

consideración que en cualquier momento se cuenta con la facilidad de agrandar la capacidad de las funciones previamente programadas por medio de los módulos de expansión.

Comenta Villacañas (2019), el sistema Profibus, permite conectar en red con diferentes dispositivos de recolección de campo y también como sistema de bus, consiguiendo con eso permitir la automatización de cualquier proceso que sea solicitado en la industria, estando comprometidos con la optimización y mejoramiento de tiempos en el proceso, alcanzando una velocidad para transmitir datos de 9.7 kbits/s a 12 Mbits/s.

1.10. Topología de redes de comunicación

Se describen los componentes fundamentales de una red, los cuales son el servidor, los terminales, los dispositivos de red y el medio de comunicación. Se presenta una descripción de los conceptos fundamentales.

1.10.1. Definición

Definen Fonseca y Játiva (2018), como el arreglo que puede ser de la forma lógica y física, en donde se describen los dispositivos de una red de comunicación y la forma es que se interconectan, es por medio de la comunicación de datos. La topología que se maneja en red fija como se anuncian los aparatos electrónicos entre sus puntos. Dependiendo de la aplicación dentro de la industria se derivan estudios donde la comunicación asocia sus nodos.

Las principales características de una topología es determinar la cifra de nodos que se acoplarán en el sistema, cómo es el uso de acceso, de cuanto es

el lapso de respuesta, prontitud con la que se procesa la pesquisa, coste de la implementación y los tipos de aplicaciones.

Para las atenciones de la industria se tiene la opción de asumir un razonamiento físico o lógico. Cuando se habla de la reflexión física hace referencia al esbozo de la red de comunicación que debe incluir el establecimiento y emplazamiento de cables y dispositivos. Para la lógica Yumba y Landivar (2017) tiene como referencia al método de cómo se traslada la información del proceso mediante las entradas y salidas de los nodos de la red de comunicación.

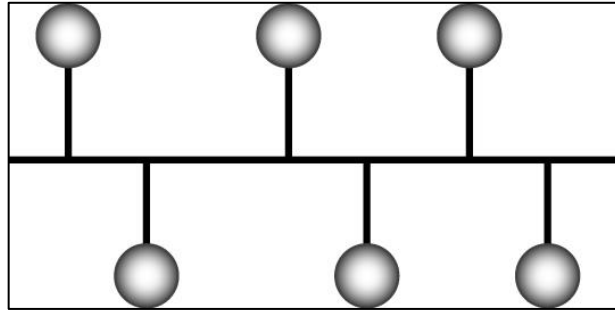
1.10.2. Clasificación

La topología de red se define como el mapa físico o lógico de una red para intercambiar datos. En otras palabras, es la forma en que está diseñada la red, sea en el plano físico o lógico, para lo cual se presenta la clasificación de redes.

1.10.2.1. En bus

Para la topología Balcells, Romeral y Martínez (1997), en Bus es caracterizada por un conducto principal con los conectores de red de comunicación interrelacionados al Bus principal y se considera como una topología pasiva, porque al momento de transmitir información no debe de haber algún otro dispositivo del Bus, también transmitiendo datos. Asiduamente se utiliza el cable tipo coaxial como forma de aviso dentro del sistema.

Figura 11. **Configuración tipo Bus**

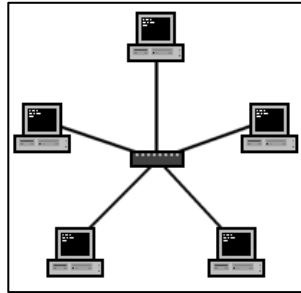


Fuente: Balcells, Romeral y Martínez (1997). *Autómatas programables*. Consultado el 22 de octubre de 2020. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=xfsSjADge70C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>

1.10.2.2. En estrella

Sugieren Corzo y Rodríguez (2013), los conectores de la red se conectan a componente central que es el Hub. Esta configuración de red sigue permaneciendo como tipo pasiva y maneja un cable de conexión para cada dispositivo electrónico, con la ventaja que es muy fácil de expandir la capacidad con tener escalas aprovechables en el Hub. La desventaja que destaca en esta configuración es la centralización de la información de la comunicación y si el Hub da problemas, se cae y quede sin información.

Figura 12. **Configuración estrella**

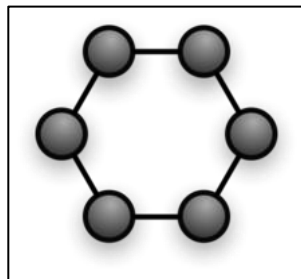


Fuente: Corzo y Rodríguez. (2013). *Red Profibus DP aplicada mediante el PLC siemens S7-300*. Consultado el 22 de octubre de 2020. Recuperado de file:///C:/Users/SERVIDOR/Downloads/digital_20799.pdf

1.10.2.3. En anillo

Para Villacañas (2019), una red que utiliza una topología del tipo anillo hace que se conecten todos los aparatos electrónicos de la red de comunicación detrás de cada uno.

Figura 13. **Configuración en anillo**

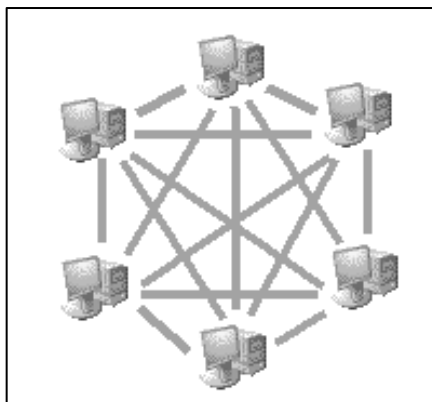


Fuente: Villacañas (2019). *Integración de PLC con modelos virtuales de plantas industriales*. Consultado el 25 de octubre de 2020. Recuperado de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/30315#preview>

1.10.2.4. En malla

Mencionan Balcells, Romeral y Martínez (1997), en la configuración tipo malla, se utilizan enlaces entre los diversos dispositivos conectados, tiene la ventaja que cada dispositivo se encuentra conectado a todos los elementos del sistema, en otras palabras, todos están conectados con todos. Uno de los inconvenientes de esta estructura es que requiere mucho cable y entra entre las redes con dificultad.

Figura 14. **Configuración en malla**



Fuente: Rodríguez y Fernández (2017). *La casa inteligente*.

1.10.2.5. Híbrida

Para Villacañas (2019) las estructuras híbridas se describen como la mixtura de topologías dentro una misma red de comunicación. Actualmente el razonamiento de árbol y también la escalonada son ejemplos de híbridas, aunque muchas veces pueden darse combinaciones según sea el estudio.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se desarrollan los capítulos que, de la investigación realizada, brindando a detalle las fases del proyecto.

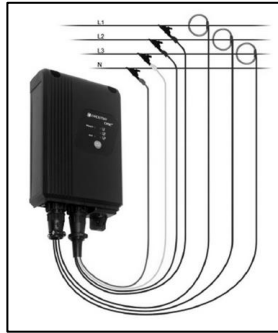
2.1. Recolección de datos iniciales de operación

Para obtener los valores iniciales de operación de la impresora flexográfica se utilizaron el Analizador de redes Circutor, Proficore y Profitrace.

El analizador de redes Circutor se instaló en la acometida eléctrica principal de la impresora por un tiempo de 7 días para obtener todas las posibles variaciones en la operación, que están en función de los pedidos ingresados por el área de producción.

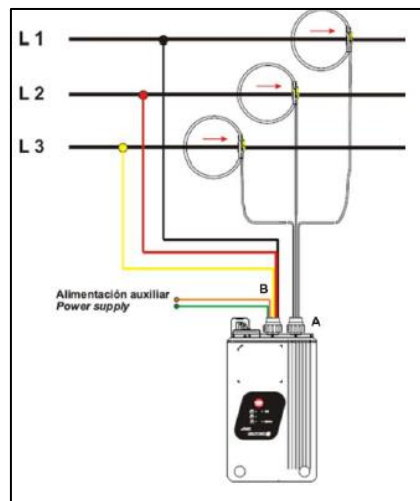
A continuación, se presentan los diagramas y gráficas obtenidas de la medición:

Figura 15. **Analizador de redes Circutor e³**



Fuente: Circutor CIRE3 Series (s.f.). *Manual del usuario*. Consultado el 22 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.pdfmanuales.com/manuals/750282/circutor-cire3-series.html>.

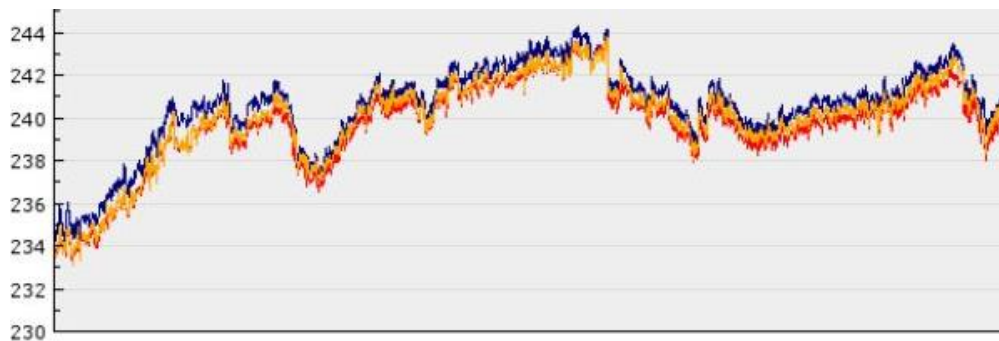
Figura 16. **Diagrama de conexión en trifásico**



Fuente: Circutor CIRE3 Series (s.f.). *Manual del usuario*. Consultado el 22 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.pdfmanuales.com/manuals/750282/circutor-cire3-series.html>.

A continuación, se presenta el voltaje de fase a fase de la conexión principal de la impresora flexográfica. Partiendo de la referencia que la alimentación eléctrica de la máquina es de 240 V trifásico a 60 Hz.

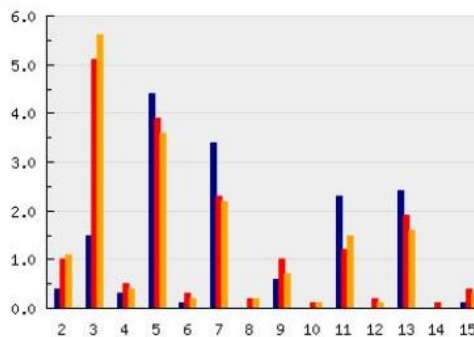
Figura 17. **Voltaje de fase a fase**



Fuente: elaboración propia, realizado con programa Analizador de Redes.

La gráfica siguiente representa los porcentajes de armónicos en la corriente que consume la máquina en su totalidad. Representando la calidad de las cargas conectadas en los diferentes circuitos internos.

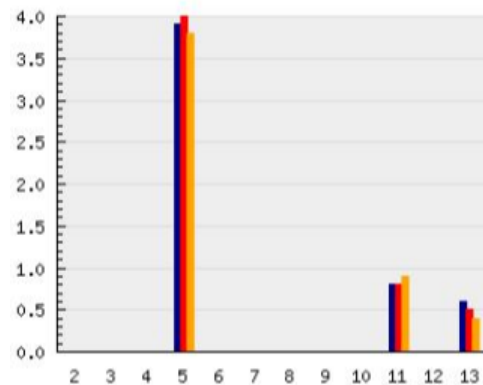
Figura 18. **Armónicos en corriente**



Fuente: elaboración propia, realizado con programa Analizador de Redes.

Los porcentajes de armónicos en la tensión se presentan a continuación y son proporcionales al consumo de las cargas no lineales del sistema causando una deformación de la onda senoidal en el tiempo.

Figura 19. **Armónicos en voltaje**



Fuente: elaboración propia, realizado con programa Analizador de Redes.

La potencia activa (Kw) consumida por la máquina se presenta en la siguiente gráfica. Presentando valores que están variando constantemente en el tiempo.

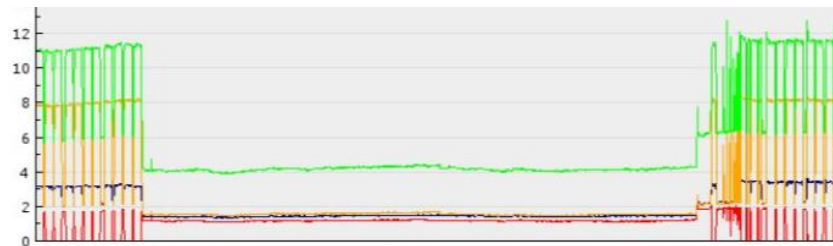
Figura 20. **Potencia activa**



Fuente: elaboración propia, realizado con programa Analizador de Redes.

La potencia inductiva (Kvar) consumida por la máquina se presenta en la siguiente gráfica. Presentando valores de cargas que utilizan bobinados para su funcionamiento y que están variando constantemente en el tiempo.

Figura 21. **Potencia inductiva**



Fuente: elaboración propia, realizado con programa Analizador de Redes.

La potencia capacitiva (Kvac) consumida por la máquina se presenta en la siguiente gráfica. Presentando valores de cargas opuestas a la inducción, que es generada por campos eléctricos dentro de los circuitos eléctricos.

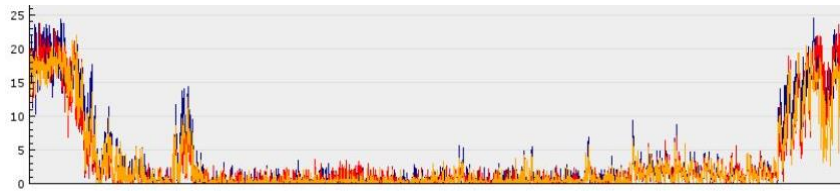
Figura 22. **Potencia capacitiva**



Fuente: elaboración propia, realizado con programa Analizador de Redes.

El *Flicker* ponderado presentado a continuación indica las fluctuaciones bruscas en el voltaje de la impresora flexográfica que están variando por arriba del 10 % del voltaje nominal de la máquina en pocos periodos de trabajo.

Figura 23. **Flicker ponderado**



Fuente: elaboración propia, realizado con programa Analizador de Redes.

Para obtener el estado inicial de la red de comunicación de datos Profibus se utilizará el programa Profitrace interconectado por el hardware Proficore al PLC principal de la impresora ubicado en el panel de control.

A continuación, se presentan los diagramas y gráficas obtenidas de la medición:

Figura 24. **Profitrace**



Fuente: Circutor CIRE3 Series (s.f.). *Manual del usuario*. Consultado el 22 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.pdfmanuales.com/manuals/750282/circutor-cire3-series.html>.

Figura 25. **Proficore**



Fuente: Circutor CIRE3 Series (s.f.). *Manual del usuario*. Consultado el 22 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.pdfmanuales.com/manuals/750282/circutor-cire3-series.html>.

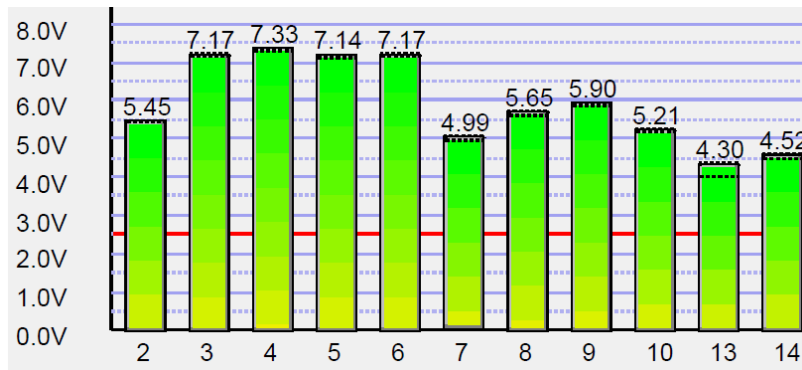
Figura 26. **Datos de la medición de la red Profibus**

2 Herramientas usadas	
Número Serie ProfiCore:	1803416597
Versión ProfiTrace:	V2.9.7
3 Propiedades Red	
Velocidad Transmis:	1.5 Mbps
Número de Maestros:	1
Número de esclavos:	30
Tiempo de Ciclo:	Mín: 11.88 ms, Avg: 12.40 ms, Máx: 12.95 ms

Fuente: elaboración propia, realizado con programa profitrace.

Los voltajes en los nodos de la red Profibus se presentan en el siguiente gráfico de barras donde los valores del voltaje varían de manera significativa.

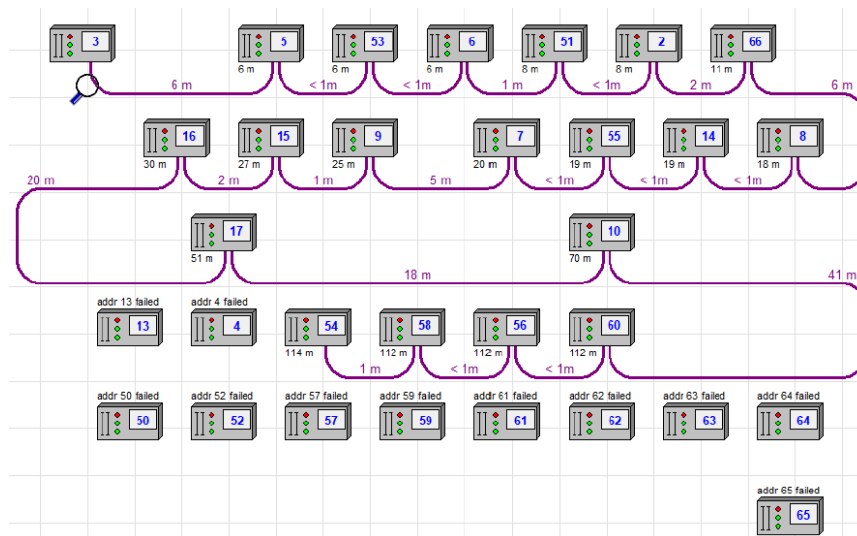
Figura 27. Voltajes en nodo



Fuente: elaboración propia, realizado con programa profitrace.

Por medio de profitrace se obtuvo la topología de la red utilizada en la impresora flexográfica. En la siguiente imagen se muestra una vista general de los dispositivos interconectados y las distancias.

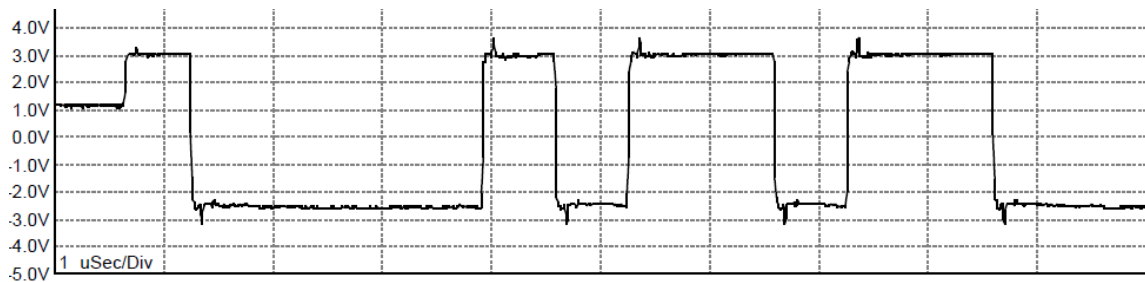
Figura 28. Topología de la red en un punto de medición



Fuente: elaboración propia, realizado con programa Profitrace.

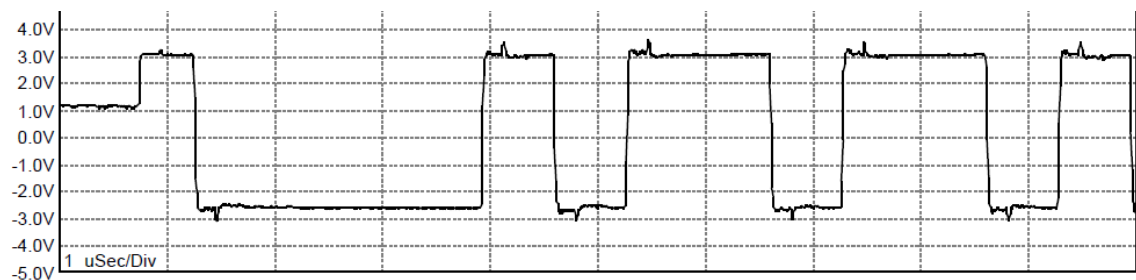
Las distorsiones en las señales de voltajes dentro de la red de comunicación se muestran en las dos siguientes imágenes. La forma de onda permanece muy estable durante los tiempos de medición.

Figura 29. **Medición de voltaje con Osciloscopio**



Fuente: elaboración propia, realizado con programa Profitrace.

Figura 30. **Medición de voltaje en un nodo esclavo**



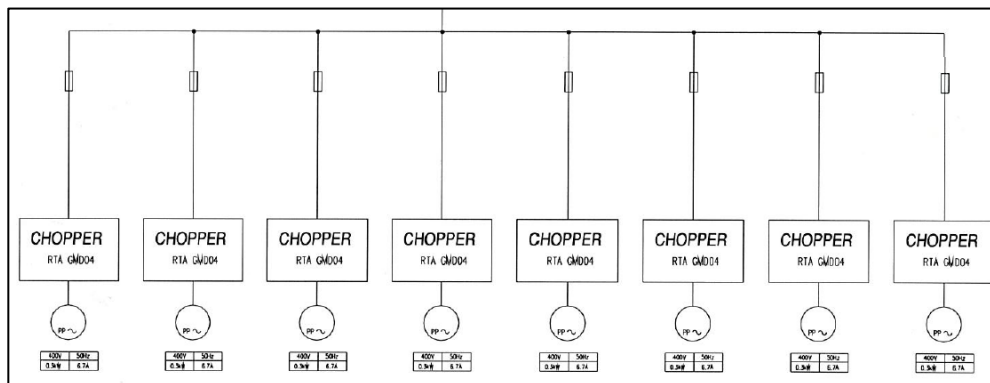
Fuente: elaboración propia, realizado con programa Profitrace.

2.2. **Actualización de dispositivos**

Los valores iniciales obtenidos indican una operación con muchos problemas que llevó a buscar dentro del sistema la causa raíz encontrando equipos principales dañados y obsoletos que fueron fabricados por empresas que

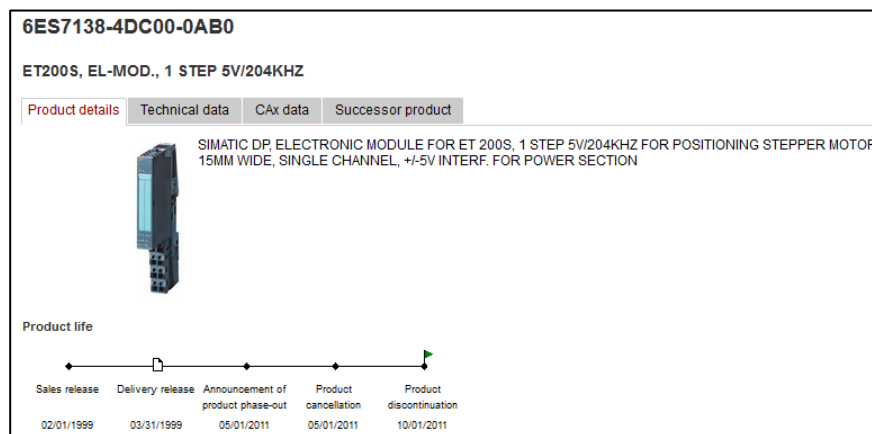
reemplazaron por nuevos modelos. Los equipos obsoletos son 12 Variadores de frecuencia Eurotherm. 20 controladores para Servomotores Indramat y 24 Módulos de control de motor Steper Siemens.

Figura 31. Módulos de motor Steper Siemens



Fuente: Circutor CIRE3 Series (s.f.). *Manual del usuario*. Consultado el 22 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.pdfmanuales.com/manuals/750282/circutor-cire3-series.html>.

Figura 32. Módulo para Steper Siemens



Fuente: Siemens. (2009). *Industry Online Support*. Consulta: junio de 2021. Recuperado de <https://support.industry.siemens.com/cs/pd/398855?pdtdi=pi&dl=en&lc=en-AR>.

Figura 33. **Variadores de frecuencia**



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Figura 34. **Controladores de Servomotores**



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Figura 35. **PLC Siemens esclavo**



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Figura 36. **Conector Profibus en mal estado en tarjeta de control**



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Figura 37. **Conector Profibus en mal estado en CPU**



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

2.3. Propuesta de estabilización del sistema

Con los valores iniciales de los voltajes en los nodos de la red Profibus se muestran en la figura 10 marcan una variación entre el voltaje más alto y pequeño de 3.57 V, dando como resultado problemas de comunicación y mala ejecución de funciones durante el proceso productivo. Generando grandes pérdidas en la producción afectando directamente la eficiencia del equipo. Dentro del Profitrace se realizaron simulaciones con un voltaje de 5 V de manera general para cada nodo dando un resultado satisfactorio dentro de la red Profibus.

La propuesta para estabilización del sistema de la impresora flexográfica se logra a través del cambio de la red Profibus, debido a que muestra una topología de red no típica para la cantidad de nodos, cables de señal dañados y 27 conectores Profibus en mal estado. El siguiente paso es el cambio de los dispositivos que generan el movimiento inteligente en la máquina, 12 variadores de frecuencia Eurotherm. 20 controladores para Servomotores Indramat y 24 Módulos de control de motor Steper Siemens, los nuevos dispositivos propuestos deben ser configurados y programados dentro del código principal Implementar una red de tierra física directamente para el sistema de electrónica de la impresora y por último se requiere la separación de la alimentación de la electrónica de potencia teniendo fuentes de 24 VDC.

2.4. Eficiencia energética de la impresora flexográfica

La impresora debería trabajar a 400 metros lineales impresos por minuto. Pero por los diferentes problemas en la comunicación de los dispositivos de movimiento inteligente está produciendo solamente 260 metros lineales impresos por minuto. Al momento que un operador aumenta la velocidad los registros se pierden por diferentes señales erróneas que reciben los servomotores imprimiendo de manera incorrecta, obteniendo un rechazo por parte del departamento de calidad.

Ecuación de eficiencia de la impresora:

$$Eficiencia (\%) = \frac{\text{metros lineales impresos por minuto actuales}}{\text{metros lineales impresos de fábrica}} * 100 \quad \text{Ec. 7}$$

Fuente: elaboración propia, realizado con Word

Ecuación de consumo energético:

$$\text{Consumo energético } \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}}\right) = \frac{\text{Energía eléctrica consumida}}{\text{metros lineales impresos por minuto}} \quad \text{Ec. 8}$$

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Con la relación planteada anteriormente y el consumo energético de la impresora flexográfica de 68.35 KWH se tiene un indicador de 2.85 *watt* / metro lineal impreso. De un 65 % de eficiencia actual de la impresora se proyecta llegar a 330 metros lineales impresos generando un aumento al 82.5 % de eficiencia productiva. Con la comparativa de eficiencia energética actual se proyecta reducir el consumo energético a 2.24 *watt* / metro lineal impreso. Y el ahorro energético se cuantifica en los distintos pedidos por parte del departamento de producción, con el aumento propuesto a 330 metros lineales impresos se pueden imprimir 17,280,000.00 metros lineales.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para cumplir con los objetivos de la investigación se analizaron las variables de estudio y se utilizó estadística descriptiva cuantitativa como herramienta para la presentación de resultados.

3.1. Condiciones iniciales de operación

Con la información obtenida con el Analizador de redes Circutor se obtuvieron las medidas de tendencia central de las variables de estudio.

En la siguiente tabla se presentan los datos relevantes obtenidos de la medición de armónicos en la corriente consumida. Las mediciones están dadas en porcentaje respecto al valor base de cada fase.

Tabla II. Armónico en corriente análisis estadístico

Valor	ARMA1	ARMA2	ARMA3
Máximo	4.40	5.10	5.60
Mínimo	0.00	0.00	0.00
Media	0.36	0.40	0.40
Mediana	0.00	0.00	0.00
Moda	0.0	0.0	0.00
Desviación estándar	0.90	0.98	1.01

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la siguiente tabla se presentan los datos relevantes obtenidos de la medición de armónicos en tensión. Las mediciones están dadas en porcentaje respecto al valor base de cada fase.

Tabla III. **Armónico en tensión**

Valor	ARMA1	ARMA2	ARMA3
Máximo	3.90	4.00	3.80
Mínimo	0.00	0.00	0.00
Media	0.11	0.11	0.11
Mediana	0.00	0.00	0.00
Moda	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	0.57	0.58	0.56

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la siguiente tabla se presentan los datos relevantes obtenidos de la medición de tensión de fase a fase de la alimentación principal de energía eléctrica. Las mediciones están dadas en Voltios.

Tabla IV. **Tensión fase a fase**

Valor	ARM1	ARM2	ARM3
Máximo	241.73	240.79	241.12
Mínimo	234.35	233.35	233.13
Media	239.03	238.06	238.37
Mediana	237.64	236.60	236.81
Moda	240.17	238.91	239.49
Desviación estándar	2.02	1.53	1.41

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la siguiente tabla se presentan los datos relevantes obtenidos de la medición de corriente consumida por la máquina. Las mediciones están dadas en Amperios.

Tabla V. **Corriente**

Máximo	150.50	190.94	193.94	178.07
Mínimo	78.22	78.70	80.32	79.08
Media	108.50	122.58	124.80	118.67
Mediana	114.36	134.82	137.13	128.58
Moda	150.50	190.94	193.94	178.07
Desviación estándar	51.11	79.36	80.34	70.00

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la siguiente tabla se presentan los datos relevantes obtenidos de la medición de potencia activa de la máquina. Las mediciones están dadas en kilovatios.

Tabla VI. **Potencia activa**

Máximo	19.89	25.30	24.98	70.01
Mínimo	10.32	10.29	10.57	31.18
Media	14.33	16.14	16.25	46.72
Mediana	15.10	17.80	17.77	50.60
Moda	19.89	25.30	24.98	70.01
Desviación estándar	6.77	10.61	10.19	27.46

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la siguiente tabla se presentan los datos relevantes obtenidos de la medición de potencia inductiva de la máquina. Las mediciones están dadas en kilovoltio-amperio inductivo.

Tabla VII. **Potencia inductiva**

Máximo	3.42	1.65	6.96	10.80
Mínimo	2.10	1.07	1.97	5.72
Media	2.68	1.33	3.70	7.86
Mediana	2.76	1.36	4.46	8.26
Moda	3.42	1.07	6.96	10.80
Desviación estándar	0.93	0.41	3.53	3.59

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la siguiente tabla se presentan los datos relevantes obtenidos de la medición de potencia aparente de la máquina. Las mediciones están dadas en kilovoltio-amperio.

Tabla VIII. **Potencia aparente**

Máximo	20.37	25.64	26.14	72.00
Mínimo	10.63	10.57	10.88	32.09
Media	14.72	16.46	16.86	48.07
Mediana	15.50	18.11	18.51	52.05
Moda	20.37	25.64	26.14	72.00
Desviación estándar	6.89	10.65	10.80	28.22

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la siguiente tabla se presentan los datos relevantes obtenidos de la medición de la distorsión armónica total en la corriente consumida por la máquina. Las mediciones están dadas en porcentajes con referencia a los valores base de cada una de las fases.

Tabla IX. **TDH corriente**

Máximo	10.00	10.00	9.70
Mínimo	6.80	7.50	7.60
Media	8.25	8.66	8.59
Mediana	8.40	8.75	8.65
Moda	6.80	7.50	7.60
Desviación estándar	2.26	1.77	1.48

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la siguiente tabla se presentan los datos relevantes obtenidos de la medición de la distorsión armónica total en el voltaje de suministro de la máquina. Las mediciones están dadas en porcentajes con referencia a los valores base de cada una de las fases.

Tabla X. **TDH tensión**

Máximo	4.40	4.30	4.20
Mínimo	4.10	4.10	4.00
Media	4.25	4.20	4.10
Mediana	4.40	4.30	4.20
Moda	4.10	4.10	4.00
Desviación estándar	0.21	0.14	0.14

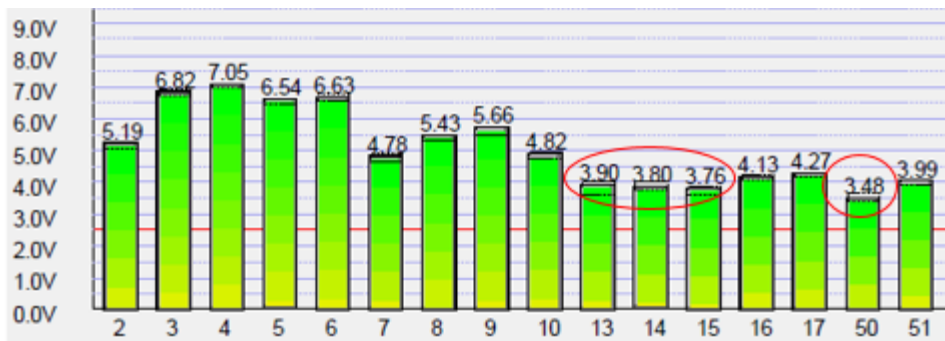
Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

3.2. **Determinación del voltaje de comunicación**

Para la determinación del voltaje de comunicación óptimo dentro del sistema de comunicación se tomó como base una medición en uno de los nodos del sistema y luego se procedió a simular voltajes dentro el rango admisible para

ver dentro de la programación la activación de los distintos dispositivos de movimiento inteligente.

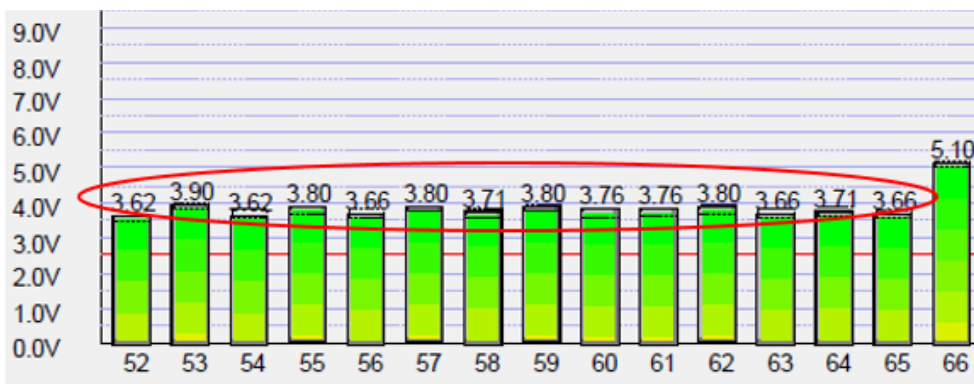
Figura 38. **Muestra de voltajes de comunicación actual**



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Profitrace.

En la siguiente figura se muestra que los nodos más lejanos tienen voltajes muy cercanos al límite de operación. Con una pequeña variación de fuente de energía puede existir una falla de comunicación.

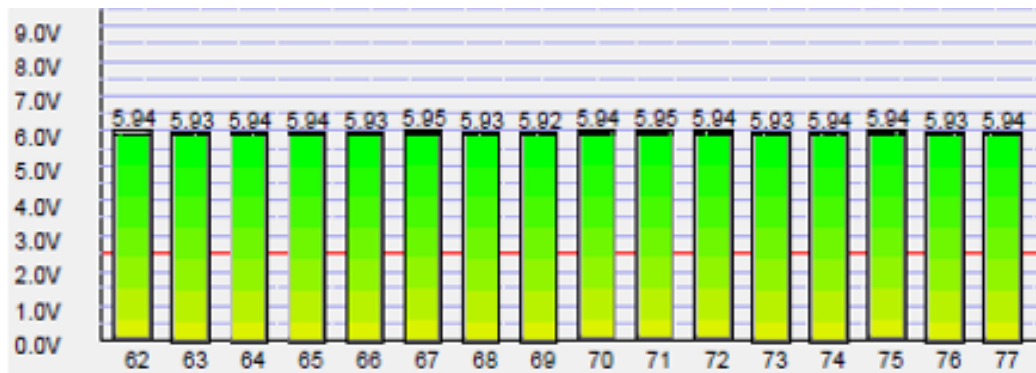
Figura 39. **Muestra de voltajes de comunicación actual**



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Profitrace.

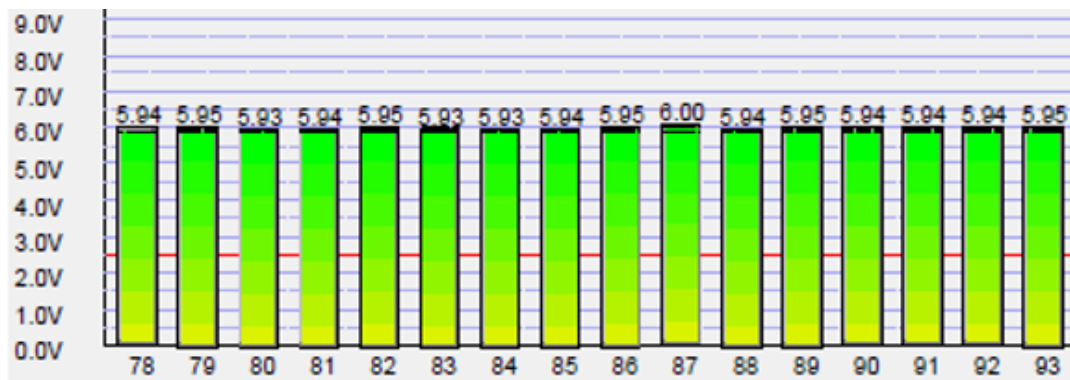
Para obtener los voltajes base se procedió a simular distintos voltajes de 0v a 9 v dentro del programa Profitrace, obteniendo como voltaje óptimo de operación de 5.8v a 6.0v. Siendo el menor voltaje posible de comunicación dentro del sistema. Las 3 figuras siguientes muestran los comportamientos en 3 diferentes puntos de simulación.

Figura 40. **Voltaje estabilizado de medición 1**



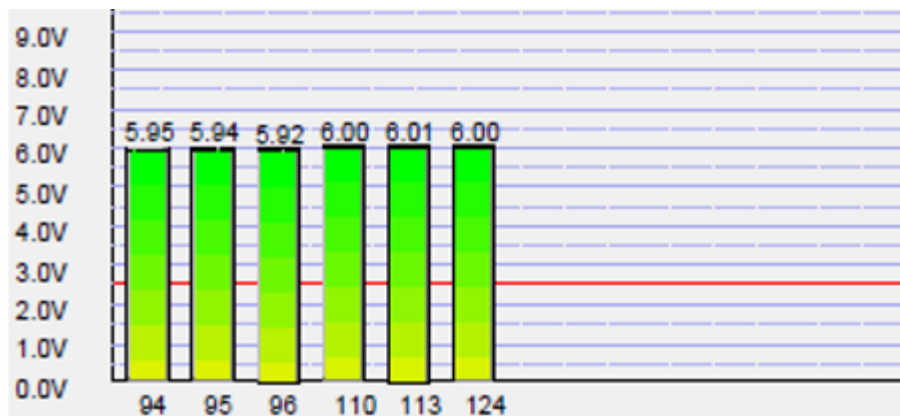
Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Profitrace.

Figura 41. **Voltaje estabilizado de medición 2**



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Profitrace.

Figura 42. **Voltaje estabilizado de medición 3**



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Profitrace.

3.3. Estabilización del sistema de comunicación

La propuesta técnica de actualización de dispositivos de movimiento inteligente que logra la estabilización del sistema consiste en realizar una modificación de la topología de red Profibus actual, el cambio de 27 conectores Profibus, el cambio de 12 variadores de frecuencia Eurotherm, 20 controladores para Servomotores Indramat y 24 módulos de control de motor Stepper Siemens.

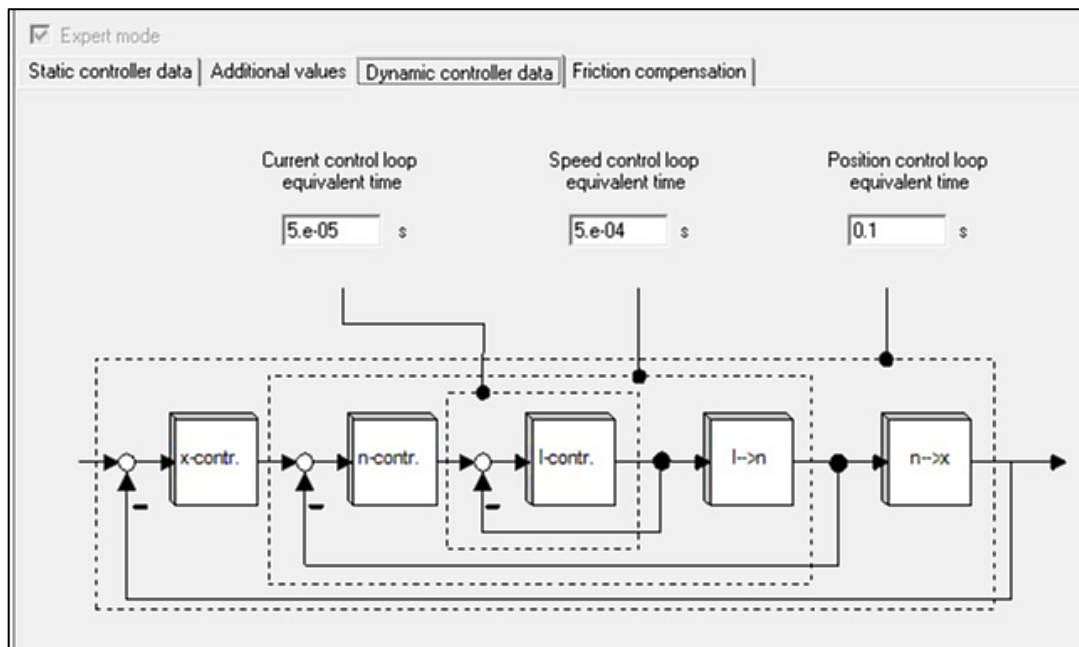
En las figuras 43 y 44 se muestran la parametrización y configuraciones para las simulaciones del nuevo sistema actualizado.

Figura 43. **Configuración y parametrización de controladores**



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

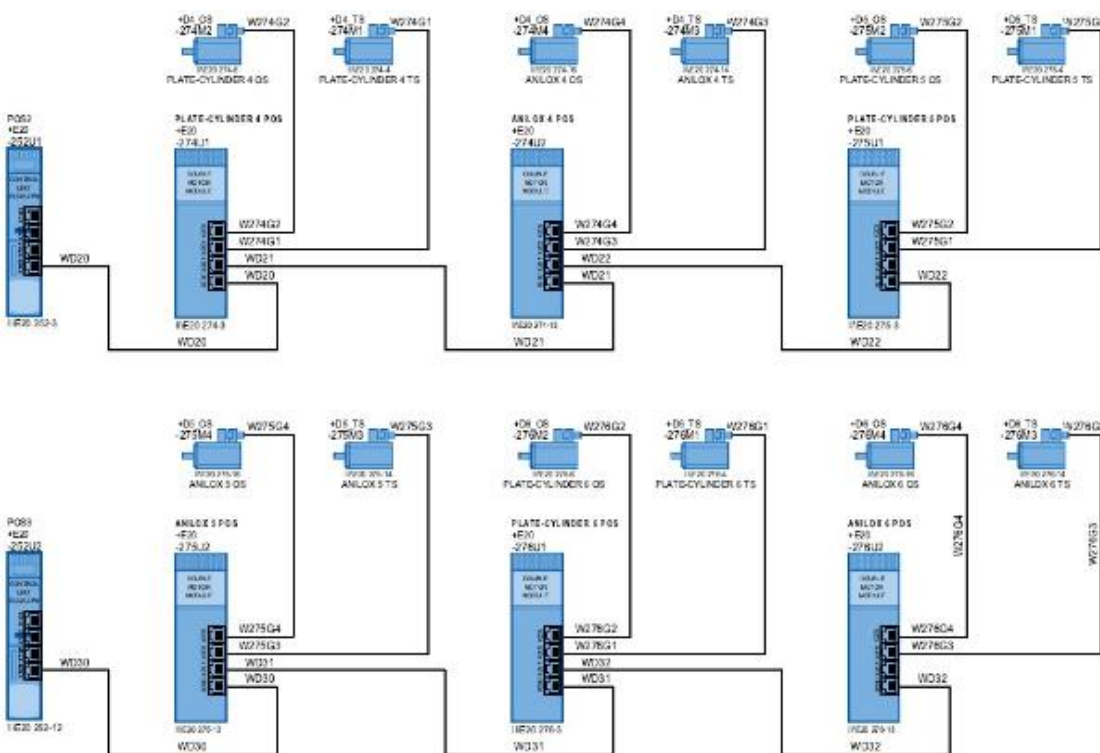
Figura 44. **Configuración de valores del sistema**



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Profitrace.

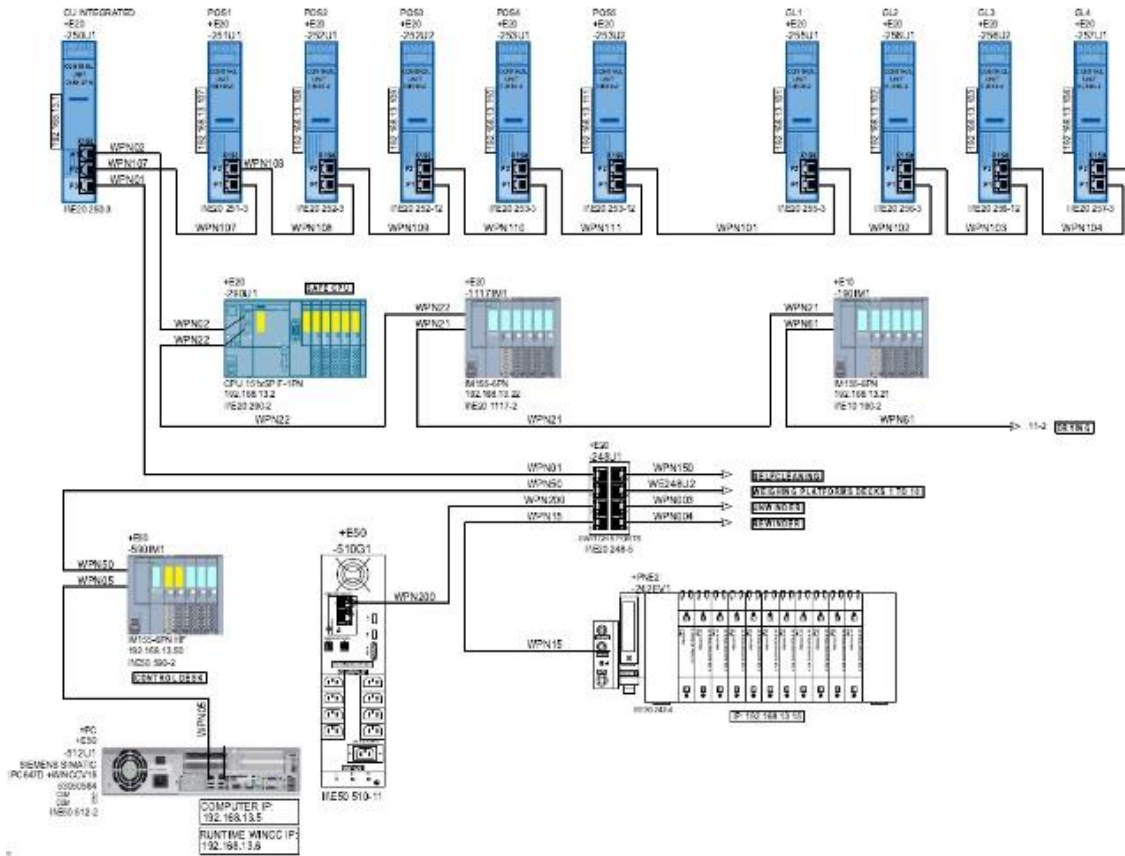
La configuración de los nuevos Controladores para los servomotores Indramat se muestra en las 02 siguientes imágenes donde se realizó de forma cascada la interconexión entre los distintos controladores y luego se envía la señal a los diferentes servomotores. Conectando el receptor principal a las entradas del PLC principal por medio de la red Profibus.

Figura 45. Configuración de los controladores de los servomotores



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Profitrace.

Figura 46. Configuración de controladores a PLC



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Profitrace.

3.4. Estimación del ahorro energético de la impresora flexográfica

El ahorro estimado con la actualización de los dispositivos de movimiento inteligente se realizó con la mejora de la eficiencia energética de 0.61 *watt*/metro lineal impreso. Brindando un ahorro mensual aproximado de Q 4,464.00.

En la siguiente tabla se presentan los valores actuales con los que está trabajando la máquina.

Tabla XI. Datos de la producción actual

Metros lineales impresos por minuto	260
Consumo de energía (kWh)	68,35
Eficiencia de producción (%)	65
Eficiencia energética (watt/metro lineal)	2,85
Promedio de metros impresos mensuales	6,500,000
Venta mensual de la producción	Q1.040.000,00

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la siguiente tabla se presentan los costos de la inversión.

Tabla XII. Inversión de la actualización.

Cambio de la red profibus	Q130.000,00
Cambio de conectores profibus	Q10.800,00
Variadores de frecuencia	Q78.000,00
Controladores para servomotores	Q100.000,00
Módulo de motores Stepper	Q88.000,00
TOTAL	Q406.800,00

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la siguiente tabla se presentan los valores estimados al realizar la actualización de los dispositivos de movimiento inteligente.

Tabla XIII. Datos de la producción proyectada

Metros lineales impresos por minuto	330
Consumo de energía (kWh)	53,85
Eficiencia de producción (%)	82,5
Eficiencia energética (watt/metro lineal)	2,24

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la siguiente tabla se presenta el ahorro energético y monetario estimado con el desarrollo de la investigación.

Tabla XIV. **Ahorro energético y monetario**

Ahorro energético	Datos
Eficiencia energética actual (<i>watt/metro lineal</i>)	2,85
Eficiencia energética proyectada (<i>watt/metro lineal</i>)	2,24
Diferencia de energía (<i>watt/metro lineal</i>)	0,61
Producción mensual (metros lineales)	11880000,00
Ahorro energético (<i>watt-hora</i>)	7246800
Costo del KWH	0,616
Ahorro monetario mensual	Q4.464,00
Retorno de la inversión con la mejora energética (meses)	92
Retorno de la inversión por máquina parada (meses)	0,4

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los valores máximos obtenidos con el Analizador de redes Circutor para la *Total Harmonic Distorsion* THD fueron del 10 % sobre la corriente y 4.40 % para el voltaje del sistema. Se esperaban valores por debajo del 5 % para alimentaciones principales y menor del 3 % para alimentadores secundarios. El resultado muestra el alto consumo inductivo reactivo en el sistema derivado principalmente de las cargas no lineales. Los valores obtenidos distorsionan la calidad de la onda afectando y el funcionamiento de los equipos.

Las tablas de tensión y corriente de los consumos de la impresora están dentro de los rangos admisibles de 240 V con una variación de hasta un 7 % del voltaje nominal. El voltaje muestra una desviación estándar máxima de 2.02. Indicando que la red eléctrica que suministra el servicio es mucha calidad y estable. Con los valores de corriente los valores fueron muy variables tanto en los consumos entre líneas como una desviación estándar de 80.34. Indicando que dentro del tiempo medido por el Analizador de redes Circutor hubo muchos cambios de pedios por parte de producción.

Las potencias obtenidas al ser directamente proporcional a los valores de corriente y voltaje obtenidos muestran variaciones significativas entre los consumos máximos entre fases y desviaciones estándar con valores de 10.61 para la potencia activa. 3.53 para la potencia inductiva y 10.80 para la potencia aparente. A pesar de contar con una red de suministro muy estable y confiable el consumo de corriente al estar relacionados generan las variaciones obtenidas.

El levantamiento del estado de la red Profibus indicó que la topología utilizada para la comunicación del equipo no es la recomendada por la cantidad de nodos y esclavos (1 nodo principal y 60 nodos esclavos). Los valores de voltaje que llegan a los nodos son muy variables y bajos llegando a estar muy cerca del límite de comunicación que es de 3.0 V. El voltaje más bajo obtenido fue de 3.48 v en el nodo 50, debiendo ser 5.0 v el valor ideal para la comunicación. Al tener voltajes críticos cualquier pequeña variación causa una caída de voltaje por debajo del valor admisible creando fallas de comunicación en el sistema. Y con los armónicos del sistema un voltaje bajo se percibe de manera muy frecuente en el funcionamiento de la maquinaria.

El ruido detectado dentro del sistema presenta una tendencia similar al problema del voltaje en nodos, porque en los más lejanos la deformación de la onda cuadrada va en incremento. Y el mal estado de 27 conectores Profibus representa la mayor fuente generadora de ruido del sistema. La figura de la onda debería mostrar una gráfica completamente cuadrada. Siendo el problema frecuente el mal contacto de los conectores dañados en los diferentes nodos y PLC del sistema.

La red Profibus se encuentra en un punto crítico por las reparaciones temporales realizadas en los distintos puntos de operación. Los conectores Profibus son los que generan la mayor cantidad de ruido eléctrico al sistema y fallas de comunicación. Es necesario el cambio de 27 conectores como prioridad y en un lapso no mayor a un mes se debe realizar nuevamente un levantamiento de la red Profibus para evaluar el estado de los conectores instalados y de los antiguos para evitar cualquier problema de comunicación en el sistema.

Por medio de simulaciones dentro del programa de Profitrace se obtuvo que el valor óptimo para lograr la estabilización del sistema es de 5.94 V. Se estabilizó

el voltaje en un primer paquete de nodos del 62 al 77, luego del 78 al 93 y por último del 94 al 124. Los valores de prueba utilizados fueron de 0 V a 9 V. Y marcando muy claramente que el límite de funcionamiento para la comunicación entre los distintos nodos es de 3.0 V.

La estabilización del sistema consiste principalmente en la actualización de los dispositivos de movimiento inteligente obsoletos por temas de antigüedad de la tecnología utilizada. Deben cambiarse sin excepción los 27 conectores Profibus, 12 variadores Eurotherm, 20 controladores Indramat y 24 módulos para los motores Stepper Siemens. Además, es necesario verificar el correcto aterrizaje de la máquina en las señales analógicas y de Encoder, tener definido el Zero digital, suministrar e instalar filtros de armónicos e instalar la tierra de potencia para chasis, puertas y pantallas.

El comportamiento de los armónicos en el sistema preocupa por el porcentaje obtenido con la medición del analizador de redes. En ciertos lapsos de tiempo los valores sobrepasaron el 5 % aceptable para sistemas de ramales secundarios provocando calentamiento excesivo en los cables de alimentación secundarios. Lo cual es necesaria una compensación capacitiva en paralelo al consumo energético que está realizando la maquinaria.

La eficiencia energética estimada para la propuesta de actualización de dispositivos de movimiento inteligente para la impresora flexográfica sería reducir en 0.61 *watt*/metro lineal impreso. Lo cual estaría proyectando un nuevo consumo energético de 2.24 *watt*/metro lineal impreso. La nueva eficiencia estaría generando un ahorro económico mensual aproximado de Q 4,464.00.

El beneficio energético obtenido con la actualización en la máquina es de 0.61 *watt* por cada metro lineal impreso, generando un ahorro de energía en el

consumo mensual de 7246800 watt-hora. También genera beneficios ambientales, siendo el más significativo el que impacta en la matriz energética de Guatemala, que es la disminución de gases contaminantes a la atmósfera los cuáles con la principal causa del efecto invernadero y cambio climático a nivel mundial.

Con la eficiencia obtenida se beneficia al ambiente reduciendo del consumo de recursos naturales y pérdidas de fertilidad de especies vegetales o daños a la fauna del planeta. Independiente si las fuentes son de recursos renovables o no renovables siempre existe un impacto ambiental en la generación de energía eléctrica. A pesar que Guatemala cuenta con un porcentaje relativamente elevado de fuentes renovables, la eficiencia energética apoya a todos las fuentes de generación de electricidad.

La eficiencia energética obtenida impacta directamente en uno de los ejes principales de la Política Energética de Guatemala que indica que es necesario tener planes para el aumento de la seguridad del abastecimiento de energía, y al necesitar menos energía para realizar el mismo producto final se dispone de energía para otros procesos productivos. Y también se trabaja con disminuir la vulnerabilidad del país para no depender de energías externas para abastecer la demanda energética del país.

El retorno de la inversión se estimó a 92 meses considerando únicamente el ahorro proyectado con la actualización de los dispositivos de movimiento inteligente. Pero el costo de no realizar el proyecto por los equipos obsoletos implicaría tener la impresora flexográfica parada con un costo aproximado por no producir de Q1,040,000.00 mensuales lo cual generaría un retorno de la inversión de 0.4 meses. El proyecto es viable.

CONCLUSIONES

1. El diseño propuesto para la actualización del sistema de automatización de la impresora flexográfica mejora la eficiencia energética de 2.85 watt/metro lineal impreso a 2.24 watt/metro lineal impreso con el cambio de 27 conectores Profibus, 12 variadores Eurotherm, 20 controladores Indramat y 24 módulos para los motores Stepper Siemens.
2. Por medio de la medición de las condiciones iniciales de operación se determinó que existe un problema crítico en las cargas conectadas debido a un alto valor de la THD en la corriente del sistema con valores cercanos al 10 % en cada fase y que existe un problema de comunicación de los dispositivos de movimiento inteligente dentro de la red Profibus por valores cercanos al límite de 3.0 V.
3. La estabilización del sistema de comunicación dentro de la red Profibus se logró en aproximadamente 5.90 V luego de varias pruebas simuladas dentro del programa Profitrace e impresora flexográfica, siendo el valor más conveniente dentro del rango permisible que abarcó de 3.0 V a 9.0 V. Dentro del voltaje determinado se consideraron posibles caídas de voltaje para no llegar a un voltaje menor a 3.0 V.
4. La estabilización del sistema de obtiene realizando la actualización de los dispositivos de movimiento inteligente dentro del sistema de automatización, lo cual incluye el cambio físico de los dispositivos, la instalación de los diferentes *drivers* de cada fabricante, la actualización de

los valores dentro de la programación y la simulación de los voltajes para encontrar el óptimo para la comunicación dentro de la red Profibus.

5. Con la actualización de los dispositivos de movimiento inteligente dentro de la impresora flexográfica se estima un ahorro energético de Q 4,464.00 mensuales debido a la reducción de 0.61 W por cada metro lineal impreso.

RECOMENDACIONES

1. Preparar un plan maestro para actualizar todos los dispositivos de movimiento inteligente considerando la metodología empleada en la investigación para minimizar el tiempo de paro de la impresora flexográfica y no afectar a los indicadores de producción.
2. Realizar un levantamiento de la red Profibus de las impresoras flexográficas por lo menos una vez cada cinco años para verificar el estado de los nodos y voltajes de comunicación del sistema, dado que las simulaciones demostraron que el voltaje es muy bajo y este tipo de prevenciones pueden ayudar a disminuir las fallas en la comunicación de los dispositivos.
3. Adquirir valores de operación de impresoras flexográfica que utilizan hasta 8 colores considerando un tiempo no menor a 7 días debido a los distintos cambios de material que realizan por parte de producción que se reflejaron en la toma de datos.
4. Utilizar el SynTop10 para la parametrización de dispositivos electrónicos debido a la fácil comunicación entre el PLC principal y una interfaz externa al sistema de operación de la máquina.
5. Realizar una actualización a las impresoras con tecnología obsoleta para evitar pérdidas económicas excesivas por un paro definitivo de los equipos.

REFERENCIAS

1. Abril, J. (2019). *Implementación de la metodología SMED en el proceso de impresión flexográfico para la reducción de tiempos de setup en una industria productora de envases plásticos flexibles*. (tesis de licenciatura). Universidad de Guayaquil, Ecuador. Recuperado de [http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/41200/1/TESIS% 20JEFFERSON%20ABRIL.pdf](http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/41200/1/TESIS%20JEFFERSON%20ABRIL.pdf)
2. Acuosa, E. (25 de mayo, 2014). Tintas en base acuosa para la aplicación ink-jet. [Mensaje de un blog]. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/276225092_Tintas_en_base_acuosa_para_la_aplicacion_ink-jet
3. Agudelo, M. (2016). *Diseño de un banco de pruebas didáctico para la operación de un sistema de control de movimiento con un servomotor Yaskawa*. (tesis de licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/7004/6298312M516.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
4. Balcells, J., Romeral, L. y Martínez, R. (1997). *Autómatas programables*. Barcelona, España: Marcombo. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=xfsSjADge70C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>

5. Benedicto, J. (2016). *Plan de mantenimiento de una máquina flexográfica de 8 colores de tambor central*. (tesis de licenciatura). Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/5574/pfc6377.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
6. Betancour, E. y Sánchez, J. (2016). *Sistema de control de velocidad de un motor trifásico mediante un variador de frecuencia y sistema Scada*. (tesis de licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/84108358.pdf>
7. Cevallos, I. (2019). *Análisis de los efectos que causan los armónicos en los motores a inducción cuando usan los variadores de frecuencia*. (tesis de maestría). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/12508/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-185.pdf>
8. Corzo, R., y Rodríguez, J. (2013). *Red Profibus DP aplicada mediante el PLC siemens S7-300*. (tesis de maestría). Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Recuperado de file:///C:/Users/SERVIDOR/Downloads/digital_20799.pdf
9. Fernández, G., Contreras, A., Herrera, V. y Olivera, M. (octubre de 2017). Controlador multieje de posicionamiento de servomotores bldc implementado en fpga. *Pistas Educativas*, 39(125), 340-361.

10. Flores, A. y Dávila, S. (2009). *Modulación senoidal de ancho de pulso (SPWM) como etapa de control en módulos de pequeña y gran escala, para aplicaciones en variadores de frecuencia*. (tesis de maestría). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20>
11. Fonseca, F. y Játiva, M. (2018). *Implementación de una red Profibus para el control de una banda transportadora en el proceso de calentamiento y reactivación del pegamento en el caucho, mediante un sistema seguidor de temperatura y extracción de gases*. (tesis de maestría). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/9210/1/108T0253.pdf>
12. González, H. y Villamizar, O. (enero de 2019). Implementación de un sistema de control para regular la velocidad y posición de motores industriales utilizando el protocolo de comunicación OPC. *Revista UIS Ingenierías*, 18(2), 147-158.
13. Hurtado, J. (2014). Tutorial redes Profibus-dp. Departamento de - Electrónica del I.E.S. España: Linares, Himilce.
14. Iriarte, J. (2017). *Aplicación del SMED para incrementar la productividad en el cambio de formato de la impresora flexográfica en la empresa POLYBAGS PERÚ SRL, SJL-2017*. (tesis de licenciatura). Universidad César Vallejo. Lima, Perú. Recuperado de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/25594/Iriarte_GJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y

15. Jiménez, T. y Arco, P. (2016). *Control de un motor de pasos utilizando un micro y un dsp.* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10614/TESIS.pdf?sequence=1>
16. Meza, C. y Sabogal A. (2018). *Análisis de metodologías para la cuantificación de pérdidas económicas por presencia de armónicos eléctricos y ocurrencia de SAGS de tensión.* (tesis de maestría). Universidad De La Salle. Bogotá, Colombia. Recuperado de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1253&context=ing_electrica
17. Penabad, L., Iznaga, M., Rodríguez, A. y Cazañas, C. (octubre de 2016). Disposición y disponibilidad como indicadores para el transporte. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(4), 64-73.
18. Rivera. L. (2018). *Módulo de prueba con servomotores, motores paso a paso, motores de corriente directa utilizando tarjeta Raspberry pi para mejorar el desarrollo de las prácticas de Robótica.* (tesis de licenciatura). Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Manabí, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/1486/1/UNESUM-ECU-REDES-2017-18.pdf>
19. Rodríguez, A. y Fernández, M. (junio de 2017). La casa inteligente. *Universidad Carlos III de Madrid*, 1, 1-8.

20. Villacañas, D. (2019). *Integración de PLC con modelos virtuales de plantas industriales*. (tesis de maestría). Universidad Carlos III de Madrid, España. Recuperado de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/30315#preview>
21. Villamar, C. (2015). *Implementación del método de medición de eficiencia general del equipo "Ege" para el mejoramiento de la eficiencia en el proceso de impresión flexográfica en la máquina impresora Comexi Gearless N° 9 de la Empresa Plásticos del Litoral*. (tesis de licenciatura). Universidad de Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <file:///C:/Users/Casa/Downloads/TRABAJO%20DE%20TITULACION%202015.pdf>
22. Vivar, C. y López, J. (2012). *Diseño e implementación de un módulo didáctico para clasificación, empaçado, e inspección de huevos aplicando PLC*. (tesis de maestría). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2852/1/108T0031.pdf>
23. Yumbla, F., y Landivar, J. (2017). *Configuración y programación del PLC S7-1200 en comunicación PROFIBUS con el UNIDRIVE SP para uso Industrial*. Boca Raton, FL, United States: Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions.

APÉNDICES

Apéndice 1. Impresora flexográfica



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Apéndice 2. **PLC principal**



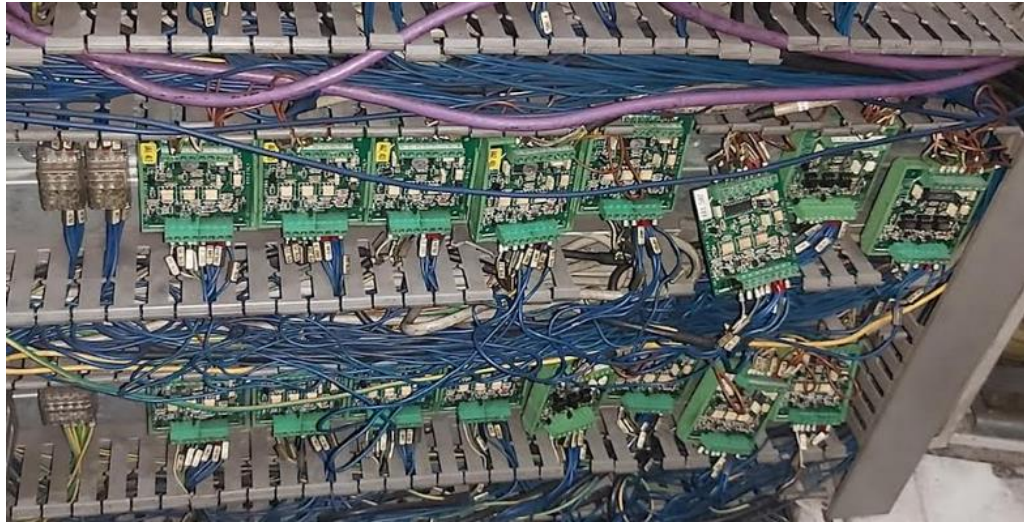
Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Apéndice 3. **Controladores de los Servomotores Indramat**



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Apéndice 4. **Pruebas a controladores de los servomotores Indramat**



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Apéndice 5. **Módulos de control de motor Stepper Siemens**



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Apéndice 6. Pruebas a módulos de control de motor Stepper Siemens



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Apéndice 7. Programa SynTop10



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Profitrace.

Apéndice 8. Comunicación con el PLC

SynTop - Active communication interface selection

☐ RS 232 - connection
 ☐ RS 485 - connection
 ☒ Ethernet (TCP/IP)
 ☒ Offline with parameter file

Port: COM6
 Baud rate: 9600
 RS485 Address:
 IP Address:
 TCP-Port HMI: 5002

parameter file: (doubleclick with mouse to view with editor)

C:\Users\EDY\Desktop\PPC0034_3.PAR

Browse...

☐ Offling, no connection (I/O logic, oscilloscope measurement results only)

OK Cancel

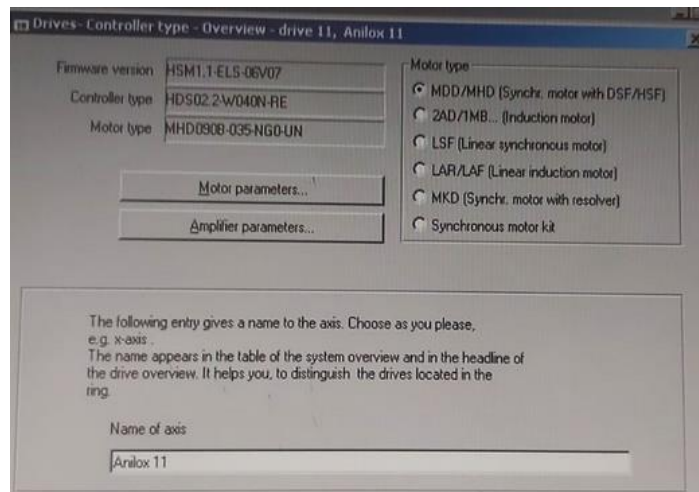
Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Profitrace.

Apéndice 9. Parametrización para pruebas

Case	Offspring CDR	Offspring IQ	Offspring IQ ²	Offspring IQ ³
Case 1	172.880	109.832	117.249	112.215
	94	51		
Case 2	142.200	74.616	55.274	38.875
	63	8.8		
Case 3	701.880	701.840	388.878	236.554
	54	55		
Case 4	787.095	795.880	247.674	245.795
	56	5.7		
Case 5	708.000	787.715	246.405	246.735
	58	68		
Case 6	702.530	783.955	243.300	243.300
	60	8.1		
Case 7	787.715	708.455	248.155	248.275
	62	8.3		
Case 8	786.570	787.130	247.420	247.450
	64	45		

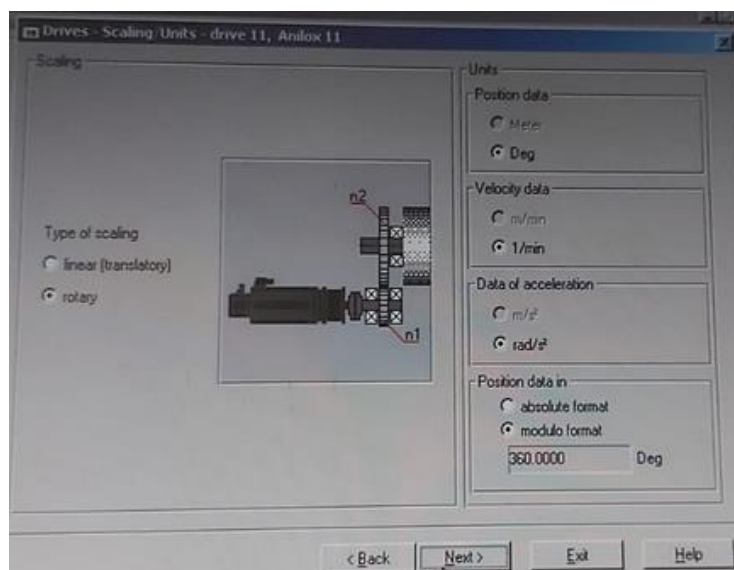
Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Apéndice 10. Configuración de los *drivers Stepper*



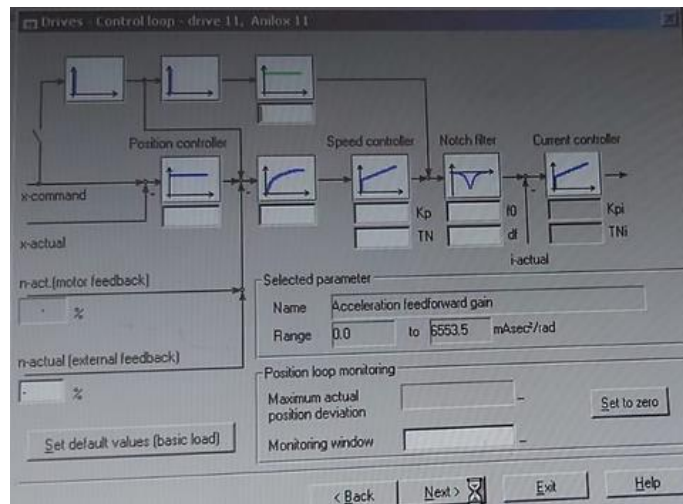
Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Apéndice 11. Configuración de los motores Stepper Siemens



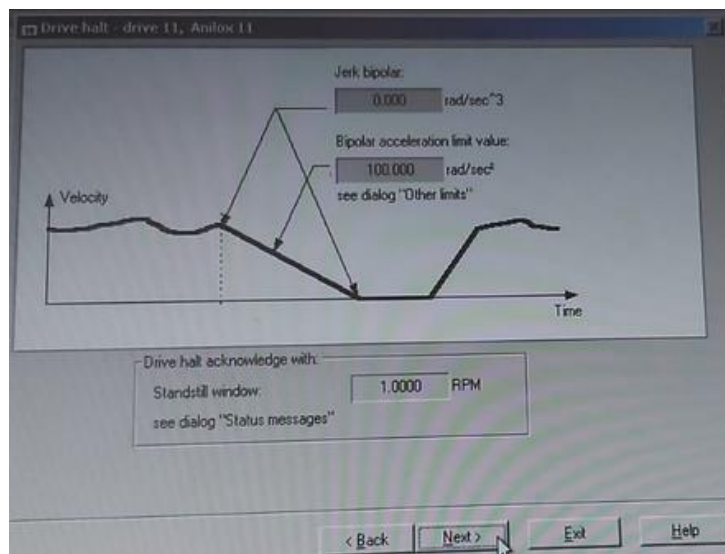
Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Apéndice 12. Curvas de motores Stepper Siemens



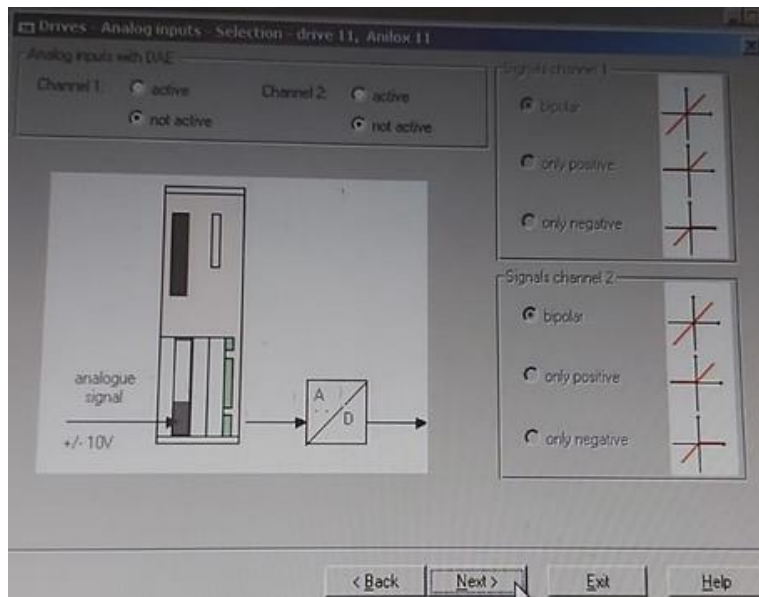
Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Apéndice 13. Velocidad de motor Stepper Siemens



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Apéndice 14. Posicionamiento del Anilox



Fuente: [Fotografía de Edinson Hernández]. [Empresa Grupo Polytec, 2021]. Colección particular. Guatemala.