

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Sincronización del sistema de tracción del proceso de recubrimiento con polietileno de los *coils* que conforman los catéteres para la empresa Boston Scientific Costa Rica

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Luis Eduardo Monge Jiménez

Cartago, Noviembre de 2012

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Marvin Hernández Cisneros

Profesor asesor



Ing. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor lector

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

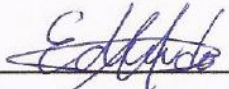
Cartago, 27 de Noviembre del 2012

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 20 de Noviembre del 2012

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Eduardo", is written over a horizontal line. The signature is contained within a light gray rectangular box.

Firma del autor

Luis Eduardo Monge Jiménez

Céd: 114460134

Resumen

La empresa Boston Scientific Costa Rica se dedica a la manufactura de productos médicos en las áreas de urología, cardiología y endoscopía. Uno de ellos es el catéter para biopsias, que se compone de un mango, un *coil* y unas pinzas. El *coil* es una espiral de forma tubular y flexible, hecho de acero inoxidable y recubierto con una capa de polietileno.

Actualmente, el proceso de recubrimiento de los *coils* con el polietileno se realiza de forma automatizada, en una línea de extrusión que cuenta con tres ejes de tracción que arrastran los *coils* a través de las fases del proceso. Sin embargo, existen problemas de calidad debido a que el recubrimiento no se mantiene homogéneo, presentándose un espesor menor al aceptable o incluso áreas expuestas del acero inoxidable del *coil*. Esto obliga a desechar varios lotes del producto, generando pérdidas económicas a la empresa.

Se determinó que el problema se debe a la falta de coordinación entre el eje de arrastre principal, el tornillo sin fin de la máquina extrusora y los otros dos ejes de tracción. De esta forma, se requiere diseñar e implementar un sistema de control automático para la velocidad de los ejes de tracción, haciendo uso de los variadores de frecuencia (VFD) que manejan estos ejes, el controlador lógico programable (PLC) que gobierna toda la línea de extrusión y realimentando el estado de la velocidad de giro del tornillo sin fin de la extrusora a través de la red de comunicación Profibus DP.

Finalmente se debe analizar la mejora lograda en el proceso de recubrimiento, la cual esta relacionada con una mayor probabilidad de obtener un producto que cumpla con los estándares de calidad de la empresa.

Palabras claves: *Coil*; Máquina Extrusora; Variador de Frecuencia; Motor de Inducción Trifásico; Controlador Lógico Programable; Eje de Arrastre; Profibus DP.

Abstract

The company Boston Scientific Costa Rica is engaged in the manufacturing of medical products at the areas of urology, cardiology and endoscopy. One is the biopsy catheter, consisting of a handle, a coil and forceps. The coil is a tubular shape and flexible spiral, made of stainless steel and coated with a layer of polyethylene.

Currently, the process of coating the coils with polyethylene is done automatically, in an extrusion line which has three drive shafts that carry the coils through the process phases. However, there are problems of quality because the coating is not remain homogeneous, presenting a thickness less than the acceptable or even exposed areas of the coil's stainless steel. This forces to discard several batches of the product, generating economic losses to the company,

It was determinate that the problem is due the lack of coordination between the principal drive shaft, the extruder machine worm and the other two drive shafts. Thus, it is required to design and implement an automatic control system for the drive shafts speed; using the variable frequency drives (VFD) that handles those shafts, the programmable logic controller (PLC) which governs the entire extrusion line and feeding back the worm's shaft state through the Profibus communication network.

Finally the achieved improvement in the coating process must be analyzed, which is related with an increase in the probability to obtain a product that meets the company's quality standards.

Key words: Coil; Extruder Machine; Variable Frequency Drive; Induction Motor; Programmable Logic Controller; Drive Shaft; Profibus DP.

Dedicatoria

Este proyecto es dedicado a mis padres Luis Monge Chavarría y Mayra Jiménez Castro, quienes con su esfuerzo, ejemplo y dedicación; me han guiado y dado el apoyo necesario para poder cumplir mis sueños y metas. A ellos les debo lo que soy ahora.

Agradecimiento

Agradezco en primer lugar a Dios por brindarme la salud, la paz y la guía; durante estos veintidós años de vida. A mi papá y mi mamá, por poner siempre en primer lugar a la familia y darnos un regalo tan valioso como la educación y formación personal y profesional. Me demostraron que quien quiere alcanzar sus objetivos, debe luchar por ellos; y que con esfuerzo y convicción, se pueden lograr.

También agradezco los buenos consejos y el apoyo de todos los otros miembros de mi familia: mis hermanas (Vanessa, Andrea y Joselyn), mis tíos y mi abuela.

A todos los profesores del ITCR de los que fui alumno, por su formación y todos sus conocimientos transmitidos. A mis compañeros y amigos de carrera, quienes estuvimos siempre apoyándonos durante el camino.

Agradezco a los ingenieros Luis Diego Salazar y Belforth Salazar; por la confianza y la oportunidad de realizar mi proyecto de graduación con la empresa INGPRO S.A y por lo formación profesional que me brindaron. Finalmente, al señor Mauricio Calvo, por haber hecho posible la realización de este proyecto en la empresa Boston Scientific Costa Rica.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	14
1.1 Problema existente e importancia de su solución.....	14
1.2 Solución seleccionada.....	19
Capítulo 2: Meta y objetivos	23
2.1 Meta.....	23
2.2 Objetivo general.....	23
2.3 Objetivos específicos	23
Capítulo 3: Marco teórico	24
3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar	24
3.1.1 Módulo brazo recolector.....	25
3.1.1.1 Brazo recolector.....	26
3.1.1.2 Prensa del eje 1	26
3.1.1.3 Eje de tracción 1: Motor Baldor Electric IDNM3538.....	26
3.1.1.4 Sensor óptico LOUT EF-SK67C 758.....	27
3.1.1.5 Control eléctrico del brazo.....	27
3.1.1.6 Control neumático del brazo	29
3.1.1.7 Interruptor del motor 1.....	30
3.1.2 Módulo ducto	30
3.1.2.1 Eje de tracción 2: Motor Baldor Electric ZDNM 3581T	31
3.1.3 Módulo máquina extrusora.....	31
3.1.3.1 Resistencias de la extrusora	32
3.1.3.2 Eje 3: Motor Siemens 6B782.....	33
3.1.3.3 Panel de temperaturas de la extrusora.....	33
3.1.3.4 Gabinete de control de la extrusora	34
3.1.4 Módulo tanque de enfriamiento.....	36
3.1.5 Módulo medidor del diámetro.....	36
3.1.5.1 Sistema de medición de diámetro Zumbach ODAD 15XY.....	37
3.1.5.2 Canal con sensor inductivo IFM IF5765	37
3.1.5.3 Panel de medición del diámetro	38
3.1.6 Módulo guillotina	38

3.1.6.1	Eje de tracción 4: Motor Baldor Electric ZDNM3969T	39
3.1.6.2	Panel de control del eje 4 y de la guillotina	40
3.1.7	Módulo banda transportadora y tubo soplador	42
3.1.7.1	Válvula de aire del tubo soplador MAC 56C-13111CA	42
3.1.7.2	Eje 5: Motor Pacific Scientific STF362.....	42
3.1.8	Diagrama de flujo del proceso de recubrimiento con polietileno de los <i>coils</i>	43
3.2	Antecedentes Bibliográficos	44
3.2.1	Variadores de frecuencia Siemens: Micromaster 6SE3214-0DA40 y Simovolt VC 6SE7016-1EA61-Z	44
3.2.1.1	Datos técnicos	45
3.2.1.2	Parámetros	46
3.2.2	PLC Siemens Simatic s7-300.....	47
3.2.2.1	Características	47
3.2.2.2	Programación en STEP 7.....	47
3.2.3	Panel de operador Siemens Simatic OP7	48
3.2.4	Red Profibus DP	48
3.3	Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.....	49
3.3.1	Velocidad de un motor de inducción trifásico	49
3.3.2	Rectificador trifásico.....	50
3.3.3	Inversor trifásico.....	50
3.3.4	Relación velocidad lineal y velocidad rotación de un eje	51
Capítulo 4:	Procedimiento metodológico	53
4.1	Reconocimiento y definición del problema	53
4.2	Obtención y análisis de información.....	54
4.3	Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución.....	55
4.4	Implementación de la solución	56
4.5	Revaluación y rediseño	58
Capítulo 5:	Descripción detallada de la solución (Explicación del diseño)	59
5.1	Análisis de soluciones y selección final.....	59
5.1.1	Caracterización del sistema utilizado para recubrir con polietileno los <i>coils</i>	59
5.1.2	Mejoras del módulo ducto y las ruedas de tracción	61

5.1.3	Sincronización de los ejes de arrastre y el tornillo sin fin de la extrusora	61
5.1.4	Estimación de la mejora alcanzada en la calidad del recubrimiento	64
5.2	Descripción del hardware	64
5.2.1	PLC Siemens Simatic s7-300.....	64
5.2.2	HMI Akses y OP7	66
5.2.3	Variadores de frecuencia que controlan los motores	66
5.2.4	Motores que mueven cada eje	67
5.2.5	Diagrama de las redes de comunicaciones Profibus DP y MPI	69
5.2.6	Relación matemática entre la velocidad de giro de cada eje y la velocidad lineal del sistema.....	70
5.2.7	Relación matemática entre la velocidad de giro de cada eje de tracción y la velocidad de giro del eje 3.....	74
5.3	Descripción del software	75
Capítulo 6:	Análisis de Resultados	79
6.1	Resultados	79
6.2	Análisis	87
Capítulo 7:	Conclusiones y recomendaciones	89
7.1	Conclusiones	89
7.2	Recomendaciones	90
Bibliografía	91
Apéndice	93
A.1	Glosario, abreviaturas y simbología	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Catéter utilizado para biopsias y sus partes: (1) mango. (2) <i>coil</i> y (3) pinzas....	14
Figura 1.2. Esquema del sistema utilizado en el recubrimiento con polietileno de los <i>coils</i> . .	15
Figura 1.3. Diagrama de bloques de los módulos que componen la línea del proceso de extrusión.	16
Figura 1.4. Recubrimiento de polietileno no homogéneo en los <i>coils</i>	17
Figura 1.5. Diagrama de interconexión de los elementos principales en las redes del sistema utilizado en el recubrimiento de los <i>coils</i> con polietileno.	19
Figura 1.6. Diagrama de flujo general del nuevo bloque función agregado al PLC s7-300. ..	22
Figura 3.1. Diagrama de bloques general del sistema utilizado en el proceso de recubrimiento con polietileno de los <i>coils</i>	24
Figura 3.2. Elementos que componen el módulo de brazo recolector: (1) brazo recolector, (2) prensa del eje, (3) eje 1, (4) sensor óptico, (5) control eléctrico, (6) control neumático y (7) interruptor del motor 1.	25
Figura 3.3. Sensor óptico LOUT EF-SK67C 758, utilizado en el módulo de brazo recolector.	27
Figura 3.4. Elementos principales del control eléctrico del brazo, (1) VFD 1 y (2) VFD 2 y (3) el PLC s7-200.	28
Figura 3.5. Lógica con la que opera el control del brazo recolector	29
Figura 3.6. Gabinete del control neumático del brazo.....	30
Figura 3.7. Módulo ducto.....	30
Figura 3.8. Eje de tracción 2.....	31
Figura 3.9. Módulo máquina extrusora.	32
Figura 3.10. Panel de temperaturas de la extrusora.	34
Figura 3.11. Parte interna del gabinete de control de la extrusora.....	35
Figura 3.12. Módulo tanque de enfriamiento	36
Figura 3.13. Módulo de medición del diámetro: (1) sistema Zumbach ODAD 15XY, (2) sensor inductivo IFM IF5765 y (3) panel de medición del diámetro AKcess.....	37
Figura 3.14. Cuchilla de la guillotina	38
Figura 3.15. Sensores inductivos IFM IG5788 antes del ingreso a la guillotina	39
Figura 3.16. Eje de tracción 4.....	40
Figura 3.17. Parte externa del panel de control del eje 4 y de la guillotina.	41

Figura 3.18. Parte interna del panel de control del eje 4 y de la guillotina.	41
Figura 3.19. Diagrama de flujo del proceso de recubrimiento con polietileno de los <i>coils</i>	43
Figura 3.20. Variadores Micromaster 6SE3214-0DA40 y Simovort VC 6SE7016-1EA61-Z. .	44
Figura 3.21. PLC Siemens Simatic S7-300 y sus cuatro módulos adicionales.....	47
Figura 3.22. Panel de operador Siemens Simatic OP7.....	48
Figura 3.23. Rectificador trifásico tipo puente.....	50
Figura 3.24. Inversor trifásico.	51
Figura 5.1. Diagrama del bloques de nivel 1 del sistema que recubre los <i>coils</i> con polietileno.	59
Figura 5.2. Diagrama del bloques de nivel 2 del sistema que recubre los <i>coils</i> con polietileno.	60
Figura 5.3. Diagrama del estado anterior de las redes y el control mediante las HMI.....	62
Figura 5.4. Diagrama del estado implementado en el modo automático de las redes y el control mediante las HMI.....	63
Figura 5.5. PLC Siemens Simatic s7-300, utilizado para implementar la solución.	65
Figura 5.6. Simatic PC Adapter USB.....	65
Figura 5.7. Interfaces HMI Akcess y OP7.....	66
Figura 5.8. Variadores de frecuencia que controlan cada uno de los motores.....	67
Figura 5.9. Motores de inducción que mueven cada uno de los ejes en la línea de extrusión.	67
Figura 5.10. Conexiones de los periféricos a las redes Profibus DP y MPI.....	70
Figura 5.11. Gráfico de la velocidad lineal (V_L) en función de la velocidad de giro del eje 3 (n_3).	72
Figura 5.12. Diagrama de flujo del bloque de programación agregado al PLC s7-300.	78
Figura 6.1. <i>Coils</i> desechados según su defecto, para el tipo de recubrimiento 1.....	82
Figura 6.2. <i>Coils</i> desechados según su defecto, para el tipo de recubrimiento 2.....	82
Figura 6.3. Situación anterior y actual de la probabilidad de obtener un <i>coil</i> con recubrimiento aceptable.	85
Figura 6.4. Situación anterior y actual de las pérdidas económicas por <i>coils</i> con un recubrimiento no aceptable.	85
Figura 6.5. Análisis del flujo de caja y periodo de recuperación de la inversión inicial del proyecto	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Características principales de los variadores de velocidad Micromaster 6SE3214-0DA40 y Simovert VC 6SE7016-1EA61-Z.....	45
Tabla 3.2. Parámetros principales de los variadores de velocidad Micromaster 6SE3214-0DA40 y Simovert VC 6SE7016-1EA61-Z.....	46
Tabla 5.1. Características eléctricas de los motores que mueven cada eje.....	68
Tabla 5.2. Encoder y variador de frecuencia de cada uno de los motores del sistema de recubrimiento.....	69
Tabla 5.3. Diámetro mínimo del coil según el tipo de recubrimiento deseado.....	71
Tabla 5.4. Velocidad lineal para cada tipo de recubrimiento para el caso en el que la velocidad del eje 3 sea de 35 rpm.....	71
Tabla 5.5. Diámetro de las ruedas de tracción de los ejes 1, 2 y 4.....	73
Tabla 5.6. Diámetro de las ruedas de tracción de los ejes 1, 2 y 4.....	76
Tabla 6.1. Cantidad de coils con un recubrimiento no aceptable y aceptable para diez lotes de producto escogidos de forma aleatoria, para el tipo de recubrimiento 1.....	80
Tabla 6.2. Cantidad de coils con un recubrimiento no aceptable y aceptable para diez lotes de producto escogidos de forma aleatoria, para el tipo de recubrimiento 2.....	81
Tabla 6.3. Análisis estadístico de la cantidad de coils con recubrimiento aceptable.....	83
Tabla 6.4. Costo, tiempo que tarda y cantidad de coils que se recubren por hora, día y mes.....	84
Tabla 6.5. Costo, tiempo que tarda y cantidad de coils que se recubren por hora, día y mes.....	84

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se da una justificación de la realización de este proyecto, al explicar de forma detallada el problema existente, su contexto y la importancia de resolverlo. También se expone la técnica y metodología utilizada en la solución del problema.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

Ingpro S.A. es una empresa dedicada al diseño, implementación y mantenimiento de sistemas electrónicos y electromecánicos. Sus clientes contemplan empresas del sector industrial, médico, alimentos, entre otros (Ingpro S.A, 2012). Sus oficinas se encuentran en el cantón de Belén, en la provincia de Heredia.

Para éste proyecto en particular, el cliente de Ingpro S.A. es la empresa Boston Scientific Costa Rica, ubicada en El Coyol de Alajuela y dedicada a la manufactura de productos médicos en las áreas de Endoscopía, Urología y Cardiología (Boston Scientific, 2012).

Uno de los productos más usados en estas áreas son los catéteres para biopsias (figura 1.1), que se conforman de un mango, un tubo largo y flexible de acero inoxidable recubierto con polietileno, conocido como *coil* y unas pinzas.

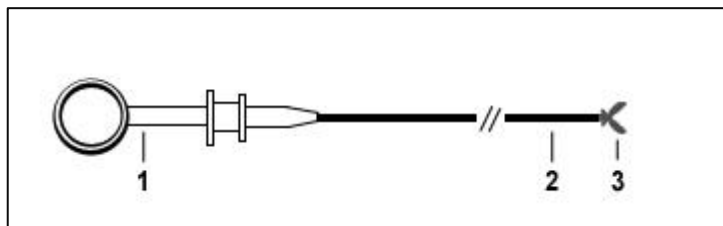


Figura 1.1. Catéter utilizado para biopsias y sus partes: (1) mango. (2) *coil* y (3) pinzas¹.

¹ Figura tomada de http://www.bostonscientific.com/templatedata/imports/multimedia/PulmonaryEndoscopy/sch_pulmrij3_362wx150h_01_bw_s10_us.jpg

En cuanto a la descripción del proceso de recubrimiento con polietileno de los *coils*, la figura 1.2 muestra un esquema del sistema utilizado. En esta línea de extrusión se recubren dos tipos diferentes de *coils*, con requerimientos de espesor distintos.

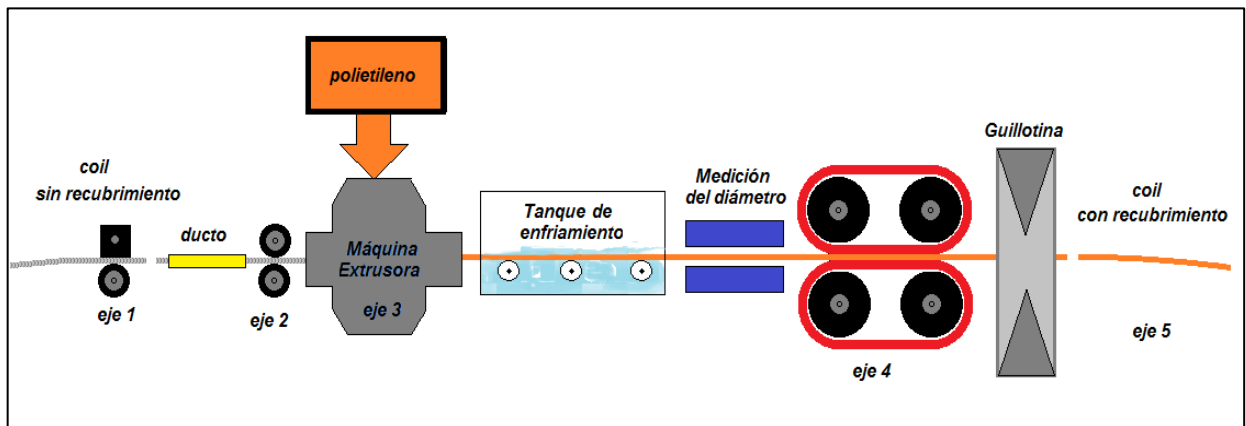


Figura 1.2. Esquema del sistema utilizado en el recubrimiento con polietileno de los *coils*².

Primeramente, un brazo recolector toma un *coil* sin recubrimiento y lo coloca en el eje 1 que lo arrastra hasta el ducto. Luego el eje 2 lo guía hacia la máquina extrusora, en la cual se tiene polietileno sólido granulado que es derretido y vertido sobre a superficie del *coil*. Dentro de la extrusora está el eje 3, que consiste en un tornillo sin fin encargado de transportar el polietileno por las resistencias de la extrusora para que se derrita. Un tanque de enfriamiento con agua hace que el polietileno disminuya su temperatura. En esta etapa se tiene una sola línea de *coils* recubiertos con polietileno, cada uno con una separación de 10 cm. Además, existe un módulo de medición del diámetro del *coil* que determina si el espesor del recubrimiento es el adecuado. Luego, el eje 4 es el que brinda la tracción principal a toda la línea de *coils*, cuenta con cuatro ruedas y dos bandas. Finalmente una guillotina corta la línea de *coils* con recubrimiento de polietileno a la mitad de la separación entre cada *coil* y caen a una banda transportadora que los coloca en una canoa de producto terminado.

² Figura realizada con el programa Paint.

En la figura 1.3 se muestra un diagrama de bloques para tener un mejor entendimiento de los módulos que componen el sistema; los cuales pueden agruparse en siete: (1) Brazo recolector, (2) Ducto, (3) Extrusora, (4) Tanque de enfriamiento, (5) Medición del diámetro, (6) Guillotina y (7) Banda transportadora y tubo soplador. Además, pueden notarse los cinco ejes con los que cuenta el sistema, de los cuales tres son de tracción, uno es el del tornillo sin fin de la extrusora y el otro es el que mueve la banda transportadora.

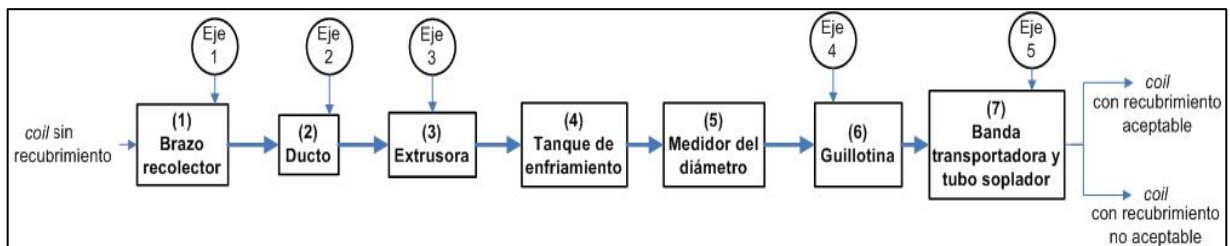


Figura 1.3. Diagrama de bloques de los módulos que componen la línea del proceso de extrusión.³

Al iniciar la operación de la línea, primero se enciende la extrusora y se realizan varios ajustes, uno de estos es la velocidad del tornillo sin fin (eje 3), para que el recubrimiento de polietileno pueda ser vertido en el *coil*. Luego se deben colocar en posición todos los demás bloques para operar la línea, en ese momento se puede cambiar la velocidad de giro del eje de tracción principal (eje 4) desde un panel de operador y automáticamente el eje de la extrusora cambia su velocidad. Esta sincronización tiene sólo una dirección, es decir, al cambiar la velocidad de giro del eje 4 también lo hace el eje 3, pero no al contrario. Además, está sólo para estos dos ejes. La velocidad de rotación del eje 1, eje 2 y eje 5 es un parámetro que se mantiene como constante.

³ Diagrama realizado con el programa Microsoft Office Visio

Ahora bien, el problema existente radica en que la empresa Boston Scientific Costa Rica está teniendo problemas de calidad en la producción de los *coils*, debido a que en ocasiones el recubrimiento de polietileno no cuenta con el espesor mínimo o no se mantiene homogéneo, presentándose áreas expuestas del acero inoxidable de los *coils*, tal y como se manifiesta en la fotografía de la figura 1.4.



Figura 1.4. Recubrimiento de polietileno no homogéneo en los *coils*.

Esto obliga a desechar varios lotes del producto que no cumplían los estándares de calidad, en cuanto a homogeneidad y espesor del recubrimiento, generando pérdidas económicas y poniendo en riesgo la salud de los clientes que usen un catéter con defectos; factor que está ligado a una eventual demanda para la empresa y una mala reputación de sus productos. Por lo tanto, mediante el desarrollo de este proyecto se pretende mejorar la calidad del recubrimiento de polietileno de los *coils*.

Cabe destacar que el espesor del recubrimiento está ligado a la velocidad con la que el tornillo sin fin de la extrusora opera, ya que a mayor velocidad de giro, se vierte más polietileno en el *coil* y el espesor aumenta. La homogeneidad está relacionada con la velocidad lineal de todo el sistema de tracción, si esta se mantiene constante, se logra un recubrimiento homogéneo.

Con el fin de detallar el contexto del problema, se explicarán los elementos principales que componen el sistema utilizado en el proceso de recubrimiento con polietileno de los *coils*.

Para su transporte a lo largo de las diferentes etapas, se utiliza un sistema de tracción conformado por tres ejes (eje 1, eje 2 y eje 4), que se mueven con motores eléctricos de inducción trifásicos, los cuales están gobernados por variadores de frecuencia y cuentan con realimentación por *encoder*. Todo el sistema de arrastre es controlado por un PLC marca Siemens modelo SIMATIC s7-300 (maestro). Por otra parte, el movimiento del brazo neumático que se encarga de recolectar los *coils* a recubrir, es gobernado por un PLC marca Siemens modelo SIMATIC s7-200 (esclavo). También existe una red de comunicaciones Profibus DP a lo largo de toda la línea de extrusión y otras dos redes MPI con las que se gobiernan dos interfaces HMI.

En la figura 1.5 puede apreciarse la interconexión de los diferentes elementos del sistema mediante las redes. El módulo SIMATIC 300 corresponde al PLC s7-300 el cual es maestro y es quien maneja las tres redes. En la red Profibus DP, los MASTERDRIVES CBPx son los cuatro variadores de frecuencia que gobiernan los motores de los ejes de tracción y el tornillo sin fin; el SIMATIC 200 es el PLC s7-200 que controla el brazo recolector y funciona como esclavo. En las redes MPI se conectan los HMI AKcess del panel de medición del diámetro y del *Operator Panel* (OP7) del panel de control del eje 4 y de la guillotina.

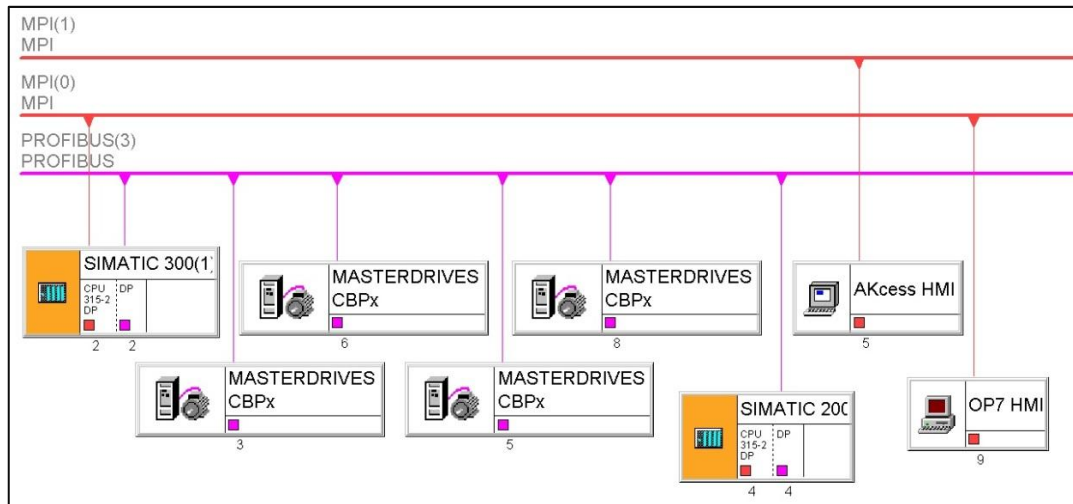


Figura 1.5. Diagrama de interconexión de los elementos principales en las redes del sistema utilizado en el recubrimiento de los *coils* con polietileno.⁴

Con la solución al problema planteado, se lograrán grandes beneficios económicos para la empresa Boston Scientific Costa Rica y aumentará su calidad de producción. Además con esto se reduce la posibilidad de que alguno de sus clientes, adquiera un catéter con algún desperfecto y ocasione una molestia o daño que desencadenaría un proceso embarazoso para la empresa o incluso una demanda legal.

1.2 Solución seleccionada

Como parte de las restricciones de la solución a implementar, se tiene el hecho de que se pueden añadir nuevas rutinas de programación al PLC principal, pero las existentes no se pueden modificar, ya que se encuentran validadas por la empresa Boston Scientific. Sin embargo, se puede enlazar cualquier elemento a la red de comunicaciones Profibus DP que tiene la línea de extrusión, de forma tal que puedan leerse o escribirse los registros y variables internas de ese elemento.

⁴ Diagrama tomado del programa Step 7

En cuanto a los requerimientos del proyecto, la empresa Boston Scientific desea:

- Mejorar la probabilidad de que los *coils* tengan un recubrimiento aceptable, la cual actualmente es de 96,5 %⁵, a al menos un 98 %. Y realizar un análisis estadístico que lo compruebe.
- Ajustar la velocidad del sistema, según el tipo de *coil* a recubrir, desde cualquiera de las HMI que dispone la línea de extrusión.
- Desbastar y vulcanizar las ruedas de tracción de los diferentes ejes, con el fin de mejorar su agarre.
- Reemplazar el ducto por un módulo equivalente con un canal y una tapa con bisagras para poder limpiarlo más fácilmente y eventualmente colocar sensores a lo largo del mismo.

Luego de realizar una inspección y valoración del sistema de arrastre, se nota que la velocidad lineal no se mantiene constante y hay ejes que tienen poca tracción. Esto se debe principalmente a la falta de sincronización que debe haber entre los tres ejes de arrastre y el tornillo sin fin de la extrusora.

Debido a que la extrusora es el módulo que empieza a operar al inicio del proceso y los operarios deben ajustar la velocidad del tornillo sin fin antes de acoplar los otros módulos del sistema, se escoge el eje 3 como el que gobierne la velocidad en los ejes de tracción, según la relación matemática que existe entre sus velocidades de giro para mantener una velocidad lineal constante.

⁵ Departamento de producción, Área de sub-ensambles, BSC

Para ello, se agregó un nuevo bloque de función en la programación del PLC s7-300, que evalúa si se cumplen las siguientes condiciones:

- El brazo recolector está operando.
- La canoa de *coils* a recubrir y el tanque de enfriamiento están en posición correcta.
- Los interruptores de las guardas de la guillotina y el eje de tracción principal están cerrados.

Al verificar estas condiciones, se emula un modo automático en donde se sobrescriben las velocidades de los ejes de tracción según la relación matemática que existe con la velocidad del tornillo sin fin. Para ellos se utiliza el PLC s7-300, los variadores de frecuencia y la red de comunicaciones Profibus DP que existe entre ellos.

También se evalúa una variable relacionada con el tipo de catéter a recubrir, la cual modifica la relación matemática entre la velocidad de los ejes de tracción y la del tornillo sin fin de la extrusora. Esto ocasiona que la velocidad lineal del sistema de tracción cambie, mientras se mantiene constante la rotación del tornillo sin fin, logrando recubrimientos con espesores distintos. Esta variable puede ser modificada desde cualquiera de los HMI y se almacena en el PLC s7-300, mediante las redes de comunicación MPI.

Para tener una mejor comprensión, la figura 1.6 muestra un diagrama de flujo general de la lógica de programación del nuevo bloque función agregado al PLC s7-300.

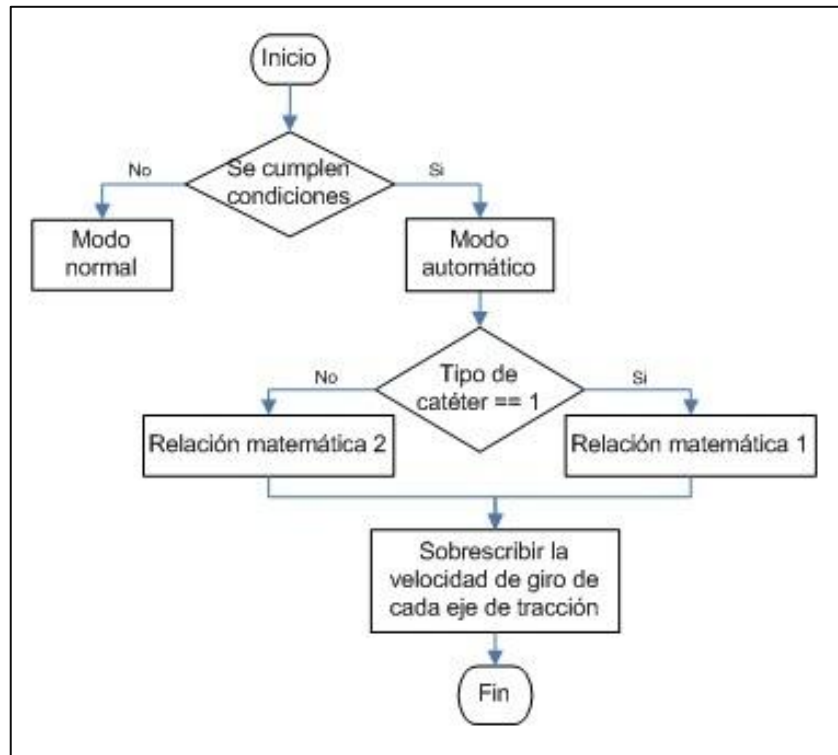


Figura 1.6. Diagrama de flujo general del nuevo bloque función agregado al PLC s7-300.⁶

⁶ Diagrama realizado con el programa Microsoft Office Visio

Capítulo 2: Meta y objetivos

2.1 Meta

Mejorar la calidad del recubrimiento de polietileno de los *coils* que conforman los catéteres.

2.2 Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema que permita sincronizar los ejes de tracción utilizados en el proceso de recubrimiento con polietileno de los *coils*.

2.3 Objetivos específicos

- a. Caracterizar, tanto mecánica como eléctricamente y de forma individual y en conjunto, el esquema de funcionamiento de los módulos: brazo recolector, ducto, máquina extrusora, tanque de enfriamiento, medidor del diámetro, guillotina y banda transportadora y tubo soplador; que componen el sistema actual de tracción.
- b. Mejorar físicamente el módulo del ducto, así como las ruedas y bandas utilizadas en el sistema actual de tracción.
- c. Desarrollar un sistema electrónico que permita sincronizar los tres ejes de arrastre y el tornillo sin fin de la extrusora, de forma tal que se obtenga una velocidad lineal constante en el proceso de recubrimiento con polietileno de los *coils*.
- d. Estimar estadísticamente la mejora alcanzada en la probabilidad de que los *coils* cuenten con un recubrimiento de polietileno que cumpla los estándares de calidad.

Capítulo 3: Marco teórico

3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar

El sistema utilizado en el proceso de recubrimiento con polietileno de los *coils* puede verse como un bloque general, en donde la entrada es un *coil* sin recubrimiento y la salida es el *coil* con el recubrimiento de polietileno, como se ejemplifica en la figura 3.1.

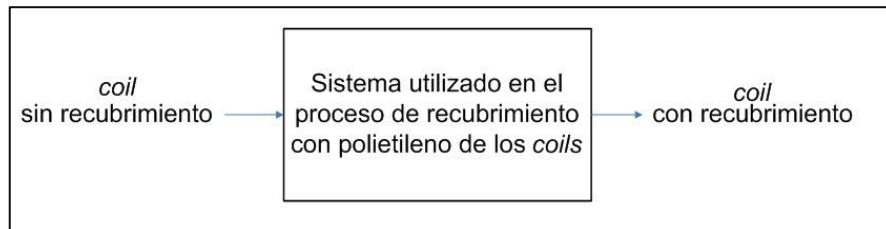


Figura 3.1. Diagrama de bloques general del sistema utilizado en el proceso de recubrimiento con polietileno de los *coils*⁷.

Anteriormente, en la figura 1.3, se mostraron los siete módulos principales que componen el sistema de recubrimiento con polietileno de los *coils*: (1) brazo recolector, (2) ducto, (3) máquina extrusora, (4) tanque de enfriamiento, (5) medidor del diámetro, (6) guillotina, (7) banda transportadora y tubo soplador. Al final del proceso, el *coil* con un recubrimiento aceptable (diámetro mayor o igual que 2,36 mm), se deposita en una canoa de producto terminado; en caso contrario, se desecha.

Seguidamente se detallarán cada uno de estos módulos y su función dentro del proceso global.

⁷ Diagrama realizado con el programa Microsoft Office Visio

3.1.1 Módulo brazo recolector

La línea del proceso de recubrimiento inicia en una canoa donde se colocan los *coils* a recubrir. En su extremo final, se encuentra el módulo de brazo neumático recolector cuya función es tomar un *coil* sin recubrimiento y colocarlo dentro del ducto. La figura 3.2 presenta varias fotografías de los elementos que componen éste módulo.

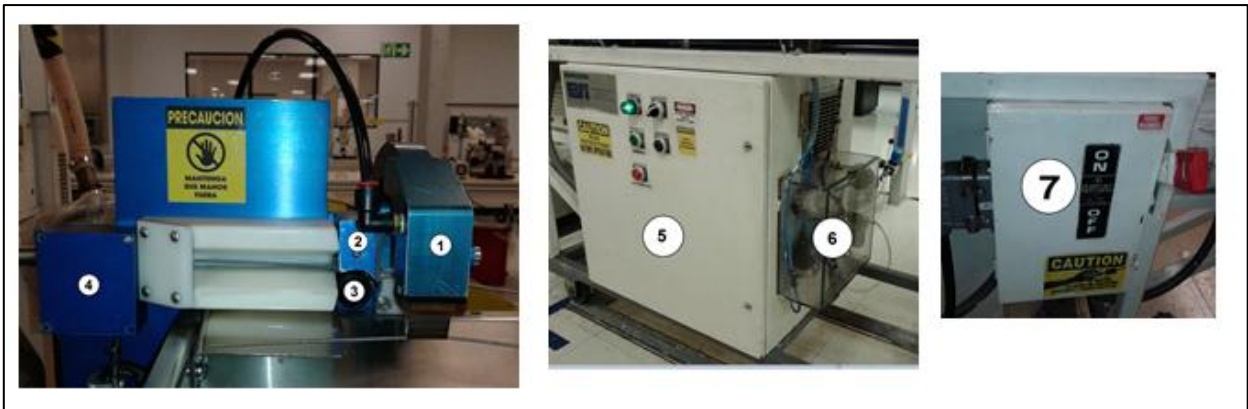


Figura 3.2. Elementos que componen el módulo de brazo recolector: (1) brazo recolector, (2) prensa del eje, (3) eje 1, (4) sensor óptico, (5) control eléctrico, (6) control neumático y (7) interruptor del motor 1.

El brazo recolector y la prensa del eje son gobernados por el control neumático, que a su vez se interconecta con el control eléctrico y dispone de una entrada de aire presurizado. El control eléctrico del brazo se encarga de gobernar la mayor parte de los otros elementos del módulo y se comunica con otros gabinetes, a través de la red Profibus DP, como el panel de medición del diámetro y gabinete de control de la extrusora. Además, controla la velocidad de giro del motor 1 (eje 1) y del motor 2 (eje 2).

3.1.1.1 Brazo recolector

Es un brazo mecánico con un pistón neumático, que hace posible el movimiento hacia arriba y hacia abajo del mismo. El brazo tiene un conducto interno que se conecta a una manguera que succiona aire a una presión de 80 psi y mediante una boquilla con una ranura en su punta, es posible tomar un *coil* de la canoa. Tiene tres posiciones: la inicial (brazo arriba), final (brazo abajo) e intermedia.

3.1.1.2 Prensa del eje 1

Consiste en una pieza mecánica con un pistón neumático que sube cuando no hay *coil* en el ducto y baja cuando el brazo coloca uno. Su función es hacer que el *coil* se mantenga en contacto con la rueda de tracción del eje 1 y pueda ser arrastrado hacia el ducto.

3.1.1.3 Eje de tracción 1: Motor Baldor Electric IDNM3538

El eje de tracción 1 dispone de una rueda de tracción con un diámetro de 2 cm y se encarga de dirigir el *coil* hacia el ducto. El movimiento de este eje se efectúa mediante una serie de acoples mecánicos con un motor eléctrico de inducción (motor 1) marca Baldor Electric modelo IDNM3538 de 230/460 VAC, 3 fases, 60 Hz, 0,5 hp y 1725 rpm⁸. Además, en el eje del motor se encuentra un motorreductor marca Dodge modelo MR96100L; el cual tiene la función de brindar una mayor capacidad de par de torsión y potencia al motor, pasando de 0,5 hp a 1,08 hp. También el motor cuenta con un *encoder* para poder realimentar su velocidad al variador de frecuencia que lo controla.

⁸ Datos leídos de la placa del motor

3.1.1.4 Sensor óptico LOUT EF-SK67C 758

Este sensor determina si hay un *coil* dentro del ducto o no, una fotografía del mismo se muestra en la figura 3.3. Normalmente está cubierto por una tapa para evitar que la iluminación del lugar afecte su desempeño. Funciona de forma tal que cuando no hay *coil*, la pieza azul baja e interrumpe el haz de luz; caso contrario la pieza se levanta y el haz de luz pasa libremente.

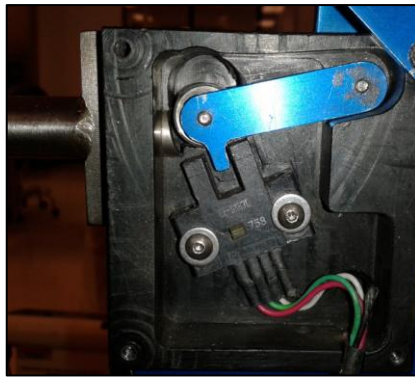


Figura 3.3. Sensor óptico LOUT EF-SK67C 758, utilizado en el módulo de brazo recolector.

3.1.1.5 Control eléctrico del brazo

En la figura 3.4 se puede notar los elementos principales de este gabinete: los VFD marca Siemens modelo Micromaster 6SE9212-8CA40 (VFD 1) y Simovert 6SE7016-1EA61-Z (VFD 2) y el PLC marca Siemens modelo Simatic s7-200 (PLC s7-200). Además puede verse el cableado de la red de comunicaciones Profibus DP en color morado.

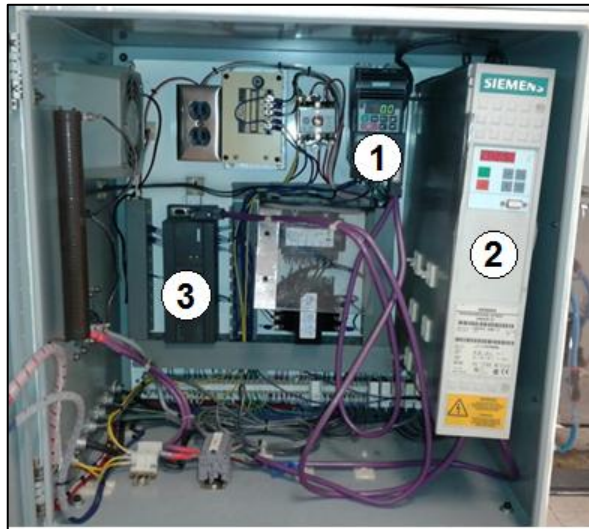


Figura 3.4. Elementos principales del control eléctrico del brazo, (1) VFD 1 y (2) VFD 2 y (3) el PLC s7-200.

En la figura 3.5 se encuentra el diagrama de flujo de la lógica de control implementada en el PLC s7-200 para la operación de éste módulo. Se puede notar que el sistema hace tres intentos para agarrar un *coil* y en caso que no lo logre, se detiene y debe ser reiniciado manualmente por un operario.

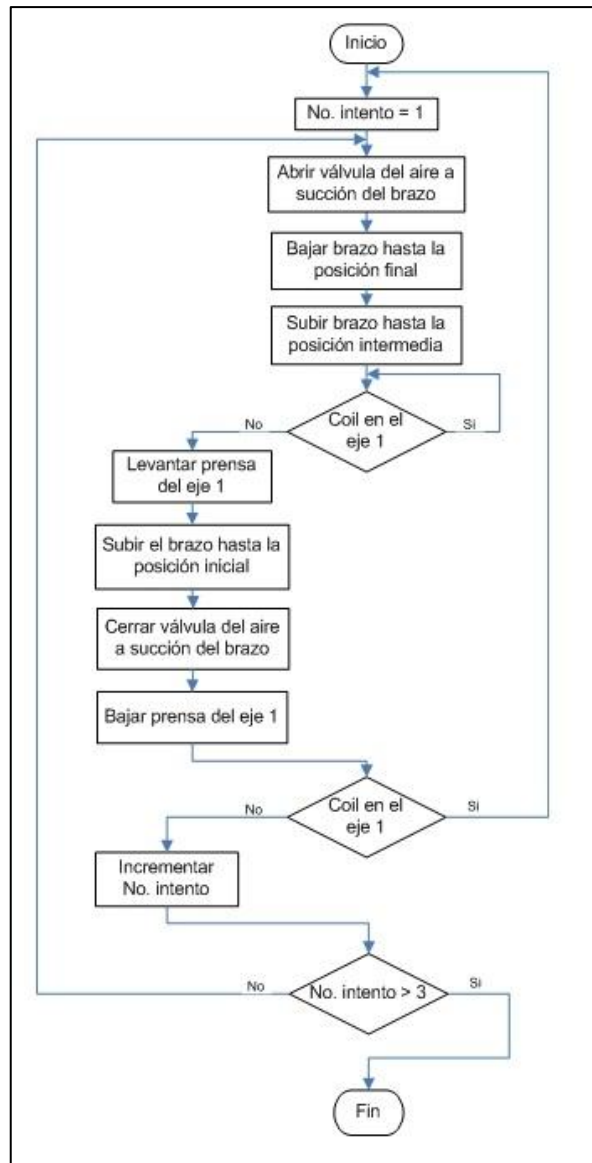


Figura 3.5. Lógica con la que opera el control del brazo recolector⁹

3.1.1.6 Control neumático del brazo

La figura 3.6 muestra el gabinete del control neumático del brazo, que es el encargado de activar los pistones que mueven el brazo recolector y la prensa del eje 1, mediante electroválvulas que se activan con el PLC s7-200.

⁹ Diagrama realizado con el programa Microsoft Office Visio



Figura 3.6. Gabinete del control neumático del brazo.

3.1.1.7 Interruptor del motor 1

El motor 1 cuenta con un interruptor marca General Electric modelo NP-266212-C. Su función es desconectar la alimentación del mismo. Tiene la capacidad de manejar 30 A a 600 VAC.

3.1.2 Módulo ducto

Consiste en un tubo de acero inoxidable que dirige al *coil* desde el módulo del brazo recolector hasta la máquina extrusora. Al final del ducto se encuentra el eje de tracción 2. Posee la desventaja que es muy difícil de limpiar y además de que no se pueden colocar sensores dentro del mismo. La figura 3.7 expone una imagen del ducto.



Figura 3.7. Módulo ducto.

3.1.2.1 Eje de tracción 2: Motor Baldor Electric ZDNM 3581T

En la figura 3.8 se muestra el eje de tracción 2, el cual posee una rueda de acero inoxidable que se encuentra a la salida del ducto. Su función es ayudar con el arrastre del *coil* para que sea recubierto con polietileno en la extrusora.

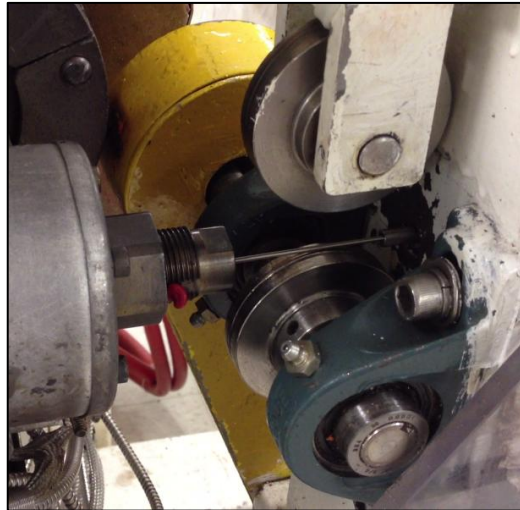


Figura 3.8. Eje de tracción 2.

Es movido por un motor eléctrico de inducción trifásico marca Baldor Electric modelo ZDNM 3581T de 230/480 VAC, 3 fases, 60 Hz, 3 hp y 1700 rpm¹⁰ (motor 2). Además, cuenta con un motorreductor marca Dodge modelo H25E-F1-SS de 1,7 HP y un *encoder* marca Encoder Division modelo X006847.

Como se mencionó anteriormente, el control eléctrico del brazo recolector se encarga de gobernar éste motor, mediante el VFD 2.

3.1.3 Módulo máquina extrusora

Posee una tolva donde ingresa el polietileno granulado y cuenta con un sistema de control de llenado, el cual opera de forma independiente de los demás sistemas. En la figura 3.9 se muestra el módulo de máquina extrusora.

¹⁰ Datos leídos de la placa del motor

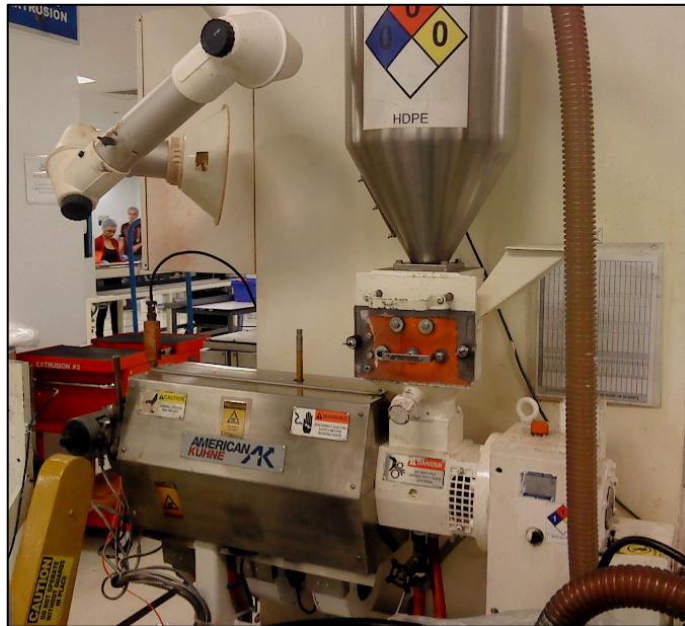


Figura 3.9. Módulo máquina extrusora.

Los principales elementos que componen éste módulo son: (1) resistencias de la extrusora que calientan y derriten el polietileno; (2) el eje 3 que consiste en un tornillo sin fin que transporta el polietileno a lo largo de las resistencias, (3) el panel de temperaturas de la extrusora y (4) el gabinete de control de la extrusora.

3.1.3.1 Resistencias de la extrusora

Hay ocho resistencias eléctricas distribuidas a lo largo de las paredes de la extrusora cuya función es calentar la máquina para que el polietileno pueda ser derretido; éstas son (1) *barrel 1*, (2) *barrel 2*, (3) *barrel 3*, (4) *clamp*, (5) *flange*, (6) *body*, (7) *retainer* y (8) *melt*. A estas resistencias se les aplica tensión eléctrica a 220 VAC para aumentar su temperatura y generar el calor necesario para derretir el polietileno.

La temperatura de cada una de estas resistencias es determinada con termocuplas tipo J y es realimentada al sistema que controla la tensión que se les aplica, de forma tal que se mantenga siempre una misma temperatura en toda la extrusora.

Para el polietileno usado en el recubrimiento de éste tipo de catéter la temperatura se mantiene en unos 230°C. El sistema de control de temperatura de la extrusora es independiente de los otros sistemas.

3.1.3.2 Eje 3: Motor Siemens 6B782

El polietileno granulado es arrastrado por un tornillo sin fin dentro de la extrusora, para que se derrita. El tornillo sin fin se mueve mediante una serie de acoples mecánicos con un motor eléctrico de inducción (motor 3) marca Siemens modelo 6B782 de 230/460 VAC, 3 fases, 60 Hz, 0,3 hp y 1700 rpm¹¹. La velocidad nominal del tornillo, una vez que se realizan los ajustes iniciales, ronda las 35 rpm.

Además, el motor 3 tiene un *encoder* marca Encoder Division modelo X006847, que se usa para realimentar el estado de la velocidad al gabinete de control de la extrusora, donde se encuentra el variador de frecuencia que controla éste motor.

3.1.3.3 Panel de temperaturas de la extrusora

La figura 3.10 muestra una imagen de la parte externa del panel de temperaturas de la extrusora. En éste panel los operarios pueden ajustar y ver el valor actual de la temperatura de cada resistencia de la extrusora. Dispone de nueve controladores de temperatura marca Barber Colman modelo 7EM.

¹¹ Datos leídos de la placa del motor



Figura 3.10. Panel de temperaturas de la extrusora.

3.1.3.4 Gabinete de control de la extrusora

La parte interna del gabinete de control de la extrusora se muestra en la figura 3.11. Los principales elementos que se encuentran en este gabinete son el variador de frecuencia marca Siemens modelo 6SE7016-1EA61-Z (VFD 3) y el PLC marca Siemens modelo Simatic s7-300 (PLC s7-300).



Figura 3.11. Parte interna del gabinete de control de la extrusora

Este gabinete se encarga de controlar la temperatura de la extrusora, por lo que como salida tiene los ocho bornes de las resistencias y como entradas las ocho termocupas tipo J. Además, controla la velocidad del tornillo sin fin mediante el VFD 3. También, se comunica con los demás gabinetes de control mediante la red Profibus DP que se conecta al PLC s7-300 mediante el puerto serie RS-485.

3.1.4 Módulo tanque de enfriamiento

La figura 3.12 muestra el módulo de tanque de enfriamiento, cuya función es bajar la temperatura del recubrimiento de polietileno de los *coils* que salen de la extrusora. Para ello utiliza agua desinfectada por luz ultravioleta, una bomba que la hace circular por todo el tanque, un enfriador marca Temp Tek modelo CF-1A y varios sensores de temperatura. Dispone de cinco rodillos que giran libremente y por los que el *coil* es guiado.



Figura 3.12. Módulo tanque de enfriamiento

Para los objetivos de este proyecto, éste módulo no es relevante ya que su funcionamiento es totalmente independiente del sistema de tracción.

3.1.5 Módulo medidor del diámetro

En la figura 3.13 se muestra el módulo de medidor de diámetro.

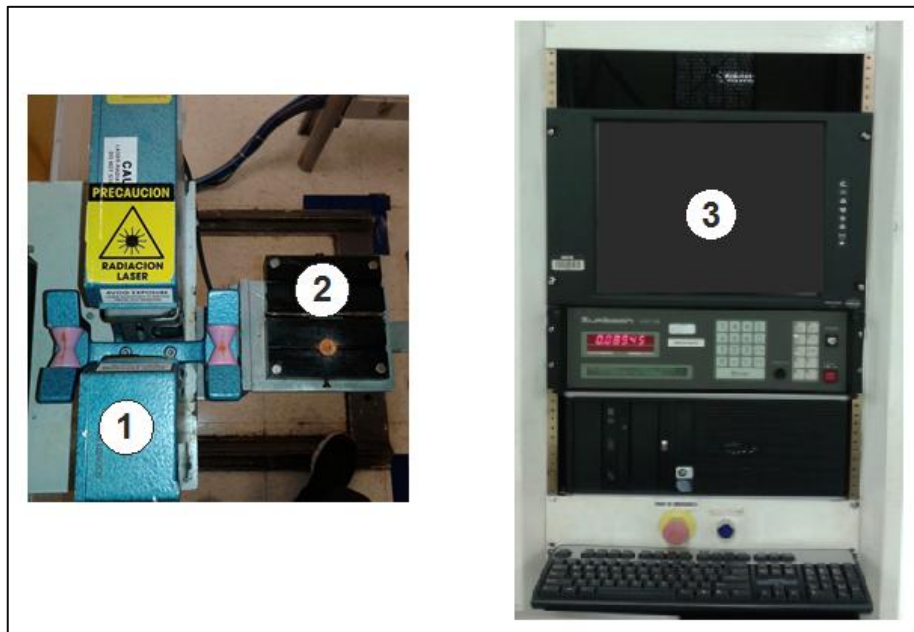


Figura 3.13. Módulo de medición del diámetro: (1) sistema Zumbach ODAD 15XY, (2) sensor inductivo IFM IF5765 y (3) panel de medición del diámetro AKcess.

3.1.5.1 Sistema de medición de diámetro Zumbach ODAD 15XY

La marca del módulo es Zumbach y el modelo es ODAD 15XY, es un sistema especializado para la medición con alta presión en los ejes vertical y horizontal con un rango de 2 a 16 mm; por lo que es el indicado para medir cables finos, cordones, tubos médicos, entre otros. Tiene un procesador e indicador asociado que es el Zumbach USYS 200; el cual se encuentra en el panel de medición del diámetro AKcess (Zumbach Electronics, 2006).

3.1.5.2 Canal con sensor inductivo IFM IF5765

El sensor detecta cuando el acero está presente. Su función es hacer que el sistema de medición del diámetro, realice una medición solamente cuando hay un *coil* con recubrimiento y no cuando se está en la zona de separación. De esta forma, se evita que el *coil* se deseche por una medición errónea.

3.1.5.3 Panel de medición del diámetro

En la figura 3.13 (3), se muestra la vista frontal del gabinete medidor del diámetro AKcess; como se puede notar dispone de un monitor, una botonera con una pantalla numérica que corresponde al sistema Zumbach USYS 200 y un CPU que cuenta con tarjetas para comunicación Profibus y MPI.

Mediante esta interfaz el operario puede ver el diámetro actual del *coil*, en la pantalla del USYS 200.

3.1.6 Módulo guillotina

Dispone de una cuchilla, la cual se muestra en la figura 3.14, que es accionada por un servomotor, marca Intek modelo PM1142-646 de 230 VAC, 3 fases, 60 Hz, 3,3 hp y 3000 rpm.



Figura 3.14. Cuchilla de la guillotina

La tira de *coils* con recubrimiento pasa por el extremo inferior, en donde hay una ranura por donde la cuchilla realiza el corte.

El control del corte de la cuchilla se realiza en el panel de control del eje 4, en donde se utilizan dos sensores inductivos marca IFM modelo IG5788 que se encuentran antes de que la tira de *coils* con recubrimiento entre a la guillotina, como puede verse en la figura 3.15. Esto asegura que el corte se realice en la zona de separación entre los *coils*.



Figura 3.15. Sensores inductivos IFM IG5788 antes del ingreso a la guillotina

Cuenta también con una tapa, con un interruptor que detiene la cuchilla si la tapa es abierta.

3.1.6.1 Eje de tracción 4: Motor Baldor Electric ZDNM3969T

Como puede verse en la figura 3.16, el eje de tracción 4 se compone de dos bandas movidas por cuatro ruedas acopladas mecánicamente a un eje vertical, cuyo movimiento se realiza con un motor eléctrico de inducción marca Baldor Electric modelo ZDNM3969T de 230/480 VAC, 3 fases, 60 Hz, 2 hp y 1800 rpm¹². En la parte superior del eje vertical se encuentra un *encoder* marca Sumtak modelo LEI-037-2500CE que funciona como transductor de la velocidad de giro del motor.

¹² Datos leídos de la placa del motor



Figura 3.16. Eje de tracción 4.

Este módulo está dentro de una caja que evita el riesgo de sufrir un atrapamiento con las partes mecánicas del mismo; la caja tiene una tapa con un interruptor de forma que cuando se abre, el eje se detiene. Este eje es el que proporciona la mayor fuerza de tracción que arrastra la línea de *coils* recubiertos con polietileno.

3.1.6.2 Panel de control del eje 4 y de la guillotina

La figura 3.17 muestra la parte externa del panel de control del eje 4 y de la guillotina. En la parte central está el OP7 (*Operator Panel*) con el que el operario puede ajustar el valor de la velocidad del eje 4, según el ancho del espesor que se desee. Para el *coil* tipo 1 (diámetro de 2,36 mm) la velocidad se ajusta a 0,533 m/s y para el tipo 2 (diámetro de 2,79 mm) se establece a 0,436 m/s. En esta interface el operario ingresa el tipo de recubrimiento que sea en el *coil*. También existe la opción de cambiar el largo del *coil*, sin embargo para este tipo de catéter su longitud se mantiene en 2,70 m, que está relacionado con la frecuencia de corte de la guillotina.



Figura 3.17. Parte externa del panel de control del eje 4 y de la guillotina.

Internamente en el gabinete hay un variador de frecuencia marca Siemens modelo 6SE7016-1EA61-Z (VFD 4), como puede verse en la figura 3.18 y es el encargado de controlar al motor que mueve el eje de tracción 4.

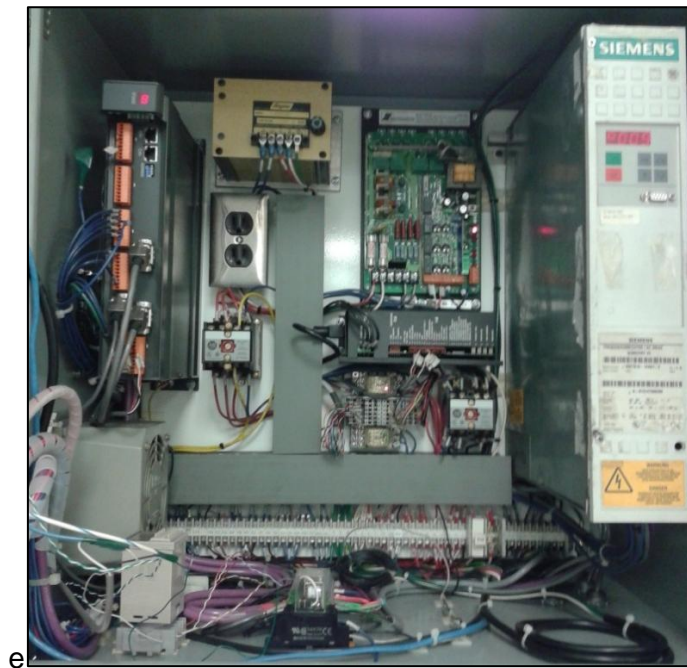


Figura 3.18. Parte interna del panel de control del eje 4 y de la guillotina.

3.1.7 Módulo banda transportadora y tubo soplador

Hay una banda transportadora en donde caen los *coils* que salen de la guillotina. Su función es desechar automáticamente los *coils* que tengan un diámetro menor al deseado. Para ello se utiliza un sistema soplador, que se basa en un tubo de acero de 3 m de largo con nueve boquillas por las que sale aire a presión cada cierto tiempo. Al soplar el *coil* cae en una canoa de producto terminado, caso contrario se desecha automáticamente en un bote de basura al final de la banda. El intervalo con el que el aire sale se ajusta según el ancho del *coil*, en este caso el ancho es de 2,70 m.

3.1.7.1 Válvula de aire del tubo soplador MAC 56C-13111CA

Para abrir y cerrar el paso de aire hacia el tubo soplador se utiliza una válvula con solenoide marca MAC modelo 56C-13111CA, la cual tiene un filtro de aire marca Watts Fluidair modelo F602-04BJ M5. La línea de control del solenoide se conecta con el panel de control del eje 4 y la salida de aire de la válvula se conecta al tubo soplador.

3.1.7.2 Eje 5: Motor Pacific Scientific STF362

Consiste en un eje que mueve la banda transportadora y se encuentra al final de la misma. Esto lo realiza gracias a un acople mecánico con un motor eléctrico de corriente continua (motor 5) marca Pacific Scientific modelo STF362, 90 VDC, 2,9 A, 0,25 hp y 1750 rpm¹³. Este motor, posee un reductor de velocidad en su eje marca Baldor modelo STF-133-10-A-A, que disminuye la velocidad de 1750 rpm a 175 rpm. Lógicamente éste motor no posee ningún variador de frecuencia asociado y su velocidad es constante, por lo que la de la banda transportadora también.

¹³ Datos leídos de la placa del motor

3.1.8 Diagrama de flujo del proceso de recubrimiento con polietileno de los coils

La figura 3.19 corresponde a un diagrama de flujo en donde se muestra la secuencia de las etapas del proceso, para el *coil* con el tipo de recubrimiento 1, en donde el diámetro aceptable es aquel mayor a 2,36 mm.

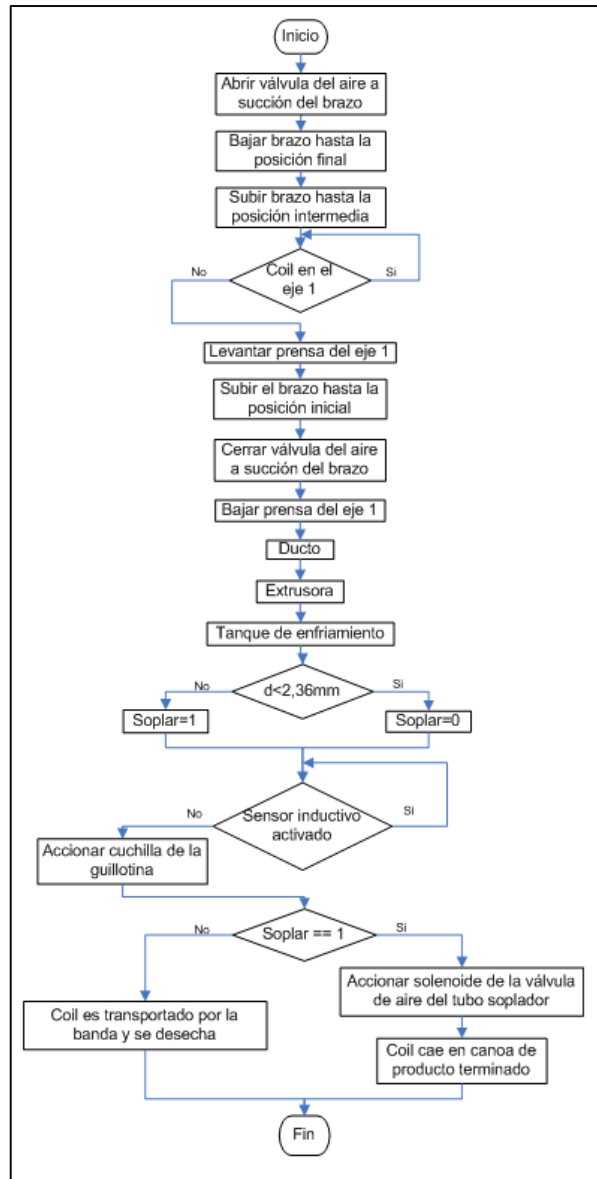


Figura 3.19. Diagrama de flujo del proceso de recubrimiento con polietileno de los coils¹⁴.

¹⁴ Diagrama realizado con el programa Microsoft Office Visio

3.2 Antecedentes Bibliográficos

3.2.1 Variadores de frecuencia Siemens: Micromaster 6SE3214-0DA40 y Simovert VC 6SE7016-1EA61-Z

Los variadores de frecuencia son ampliamente usados en la industria para el control de los motores asíncronos, ya que ofrecen la posibilidad de ajustar la velocidad de giro, ahorrar energía, proteger contra fallas, alargar la vida del motor al ofrecer arranques y frenados suaves, entre otras características.

Para este proyecto en particular se usan cuatro variadores de frecuencia Siemens, de dos modelos distintos: uno Micromaster 6SE3214-0DA40 y tres Simovert VC 6SE7016-1EA61-Z; los cuales se muestran en la figura 3.20.



Figura 3.20. Variadores Micromaster 6SE3214-0DA40¹⁵ y Simovert VC 6SE7016-1EA61-Z¹⁶.

¹⁵ Figura tomada de http://eu-reparaturen.de/uploads/repair/articles/2010/10/16/6SE9212-7DA40/hight_res/micromaster_reparatur_6SE9212-7DA40.jpg

¹⁶ Figura tomada de http://eu-reparaturen.de/uploads/repair/articles/2011/01/24/6SE7016-1EA61-Z/hight_res/1_siemens_simovert_vc_6SE7016-1EA61-Z_reparatur.jpg

3.2.1.1 Datos técnicos

La tabla 3.1 reúne las características principales de los variadores, las cuales fueron tomadas de los respectivos manuales: (Siemens, 1998) y (Siemens, 1998-1999).

Tabla 3.1. Características principales de los variadores de velocidad Micromaster 6SE3214-0DA40 y Simovort VC 6SE7016-1EA61-Z.

Característica	Valor	
	Micromaster	Simovort VC
Tensión de entrada (VAC, 3 fases)	380...500	380 ... 480
Corriente de entrada (A)	3,5	6,7
Frecuencia de entrada (Hz)	50 - 60	50 - 60
Tensión de salida (VAC, 3 fases)	0...380 – 0...500	0...380 – 0...480
Corriente de salida (A)	3,0	6,1
Frecuencia de salida (Hz)	0 ... 650	0...600
Potencia de salida (kVA)	1,875	4,1... 5,0
Potencia de salida (hp)	2	4,4.. 5,4
Factor de potencia (atraso)	≥0,98	≥0,98
Eficiencia (%)	≥97	≥97
Interface serial RS485	Sí	Sí
Módulo para conexión PROFIBUS DP	Sí	Sí

Ambos variadores disponen de dos tipos de control: el control vectorial y el control V/f.

3.2.1.2 Parámetros

Partiendo de que la parametrización inicial del variador a sido llevada a cabo según el tipo y las características del motor a controlar; para poder controlarlo remotamente mediante un PLC por ejemplo usando la red Profibus DP, se deben asegurar que los parámetros correspondientes estén configurados. La tabla 3.2 reúne la lista de los principales parámetros y sus valores de los variadores de frecuencia, necesarios para el control mediante la red Profibus DP, según (Siemens, 1998-1999) y (Simovert Masterdrives, 2000)

Tabla 3.2. Parámetros principales de los variadores de velocidad Micromaster 6SE3214-0DA40 y Simovert VC 6SE7016-1EA61-Z.

Descripción parámetro	Micromaster		Simovert		Comentarios
	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	
Dirección Profibus del variador	P0918	---	P918.01	---	Esta dirección debe ser única para cada variador dentro de la red.
Fuente para el cambio de parámetros	P0927	0011	P930	2	Red Profibus DP y panel de operación básica del variador (BOP)
Fuente para el valor de referencia del variador	P1000	0003	P368	4	Desde la red Profibus DP
Palabras a transferir desde el PLC al Variador	P2019	21	P370	3	La palabra que configura el valor de la frecuencia
Referencia de frecuencia	P1300	---	P443	---	Frecuencia de referencia con la que opera el variador

3.2.2 PLC Siemens Simatic s7-300

3.2.2.1 Características

El controlador lógico programable marca Siemens Simatic s7-300, dispone de un CPU 315-2DP con comunicación MPI, fuente de alimentación integrada de 24 VDC, memoria central de 256 KB, 2 interfaces de DP: maestro o esclavo (Siemens, 2011) . Además cuenta con los siguientes módulos adicionales:

- 2 módulos de 16 entradas digitales de 24 VDC (321-1BH02-0AA0)
- 1 módulo de 16 salidas digitales de 24 VDC (321-1BH01-0AA0)
- 1 módulo contador FM350-2 (350-1AH02-0AE0)

La figura 3.21 corresponde a una fotografía de este PLC y sus módulos.



Figura 3.21. PLC Siemens Simatic S7-300 y sus cuatro módulos adicionales

3.2.2.2 Programación en STEP 7

El *software* para la configuración y programación de los PLC Simatic es el Step 7, el cual dispone de un asistente para la creación de proyectos, el Simatic Manager. Primero es necesario configurar el hardware, como el CPU utilizado, la fuente de alimentación y los módulos externos; se configura la conexión entre el computador y el PLC poder grabar la programación. Luego se pueden crear símbolos para hacer referencia a las entradas y salidas del controlador y finalmente se debe crear el programa utilizando la lógica de escalera como lenguaje.

3.2.3 Panel de operador Siemens Simatic OP7

Este panel de operador ofrece la posibilidad de visualizar los valores de proceso del PLC al que es conectado. Además, las entradas pueden ser escritas directamente desde este panel al PLC. La figura 3.22 muestra una fotografía del mismo.



Figura 3.22. Panel de operador Siemens Simatic OP7.

La configuración del OP7 se realiza en una computadora usando un software de configuración ProTool y se transfiere al panel de operador. Luego debe ser conectado al PLC y seguirá la lógica que se le configuró. Puede comunicarse con PLCs Simatic s7 utilizando los protocolos PPI, MPI, Profibus DP (1.5 Mbaud ó 12 Mbaud) (Siemens Simatic HMI, 1999).

3.2.4 Red Profibus DP

El nombre Profibus DP proviene del inglés Process Field Bus, Decentralized Peripherals y es un protocolo de comunicación para dispositivos de campo basado en la jerarquía maestro/esclavo. Está optimizado para alta velocidad, ya que tiene un tiempo de reacción corto: puede intercambiar más de mil entradas y salidas con 32 dispositivos en menos de 10 ms (Siemens AG, 2008).

Puede trabajar como mono-maestro o multi-maestro. El maestro comúnmente es un PLC o un computador, el cual determina la velocidad de la transferencia de datos. El medio físico de conexión puede ser RS-485, en donde se utiliza un par de cobre trenzado apantallado y permite transferencias de datos entre los 9,6 kbps y 12Mbps y hasta 32 estaciones, cada estación conectada a la red debe tener una dirección distinta. La topología es de línea, con dispositivos terminales activos en sus extremos (Siemens AG, 2008).

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema

3.3.1 Velocidad de un motor de inducción trifásico

Según (Chapman, 2000), la velocidad de un motor de inducción trifásico está dada por la ecuación:

$$n_m = \frac{120 f}{p} (1 - s) \quad (3.1)$$

Donde, n_m : Velocidad del motor en rpm.

f : Frecuencia de la red trifásica en Hz.

p : Cantidad de polos de la máquina.

s : Deslizamiento entre la velocidad del rotor y la del campo del estator.

Al analizar la ecuación 3.1, puede verse que la velocidad depende de tres variables. El deslizamiento es algo que no se puede cambiar, ya que depende de la carga y de la velocidad de giro, sin embargo en ocasiones su variación es muy poca y su valor es cercano a cero. La cantidad de polos de la máquina es un aspecto que no se puede cambiar ya que depende de la construcción física del motor. Por último la frecuencia de la red es fija, ya sea 50 o 60 Hz.

No obstante, utilizando variadores de frecuencia se puede variar éste parámetro y hacer que el motor gire a diferentes velocidades.

3.3.2 Rectificador trifásico

El principio de operación de un variador de frecuencia empieza con un rectificador trifásico como el mostrado en la figura 3.23. La tensión trifásica de la red es rectificadora, con un arreglo de seis diodos, para obtener una tensión en corriente continua de $1,654 V_m$; donde V_m es la tensión de fase pico (Rashid, 1993).

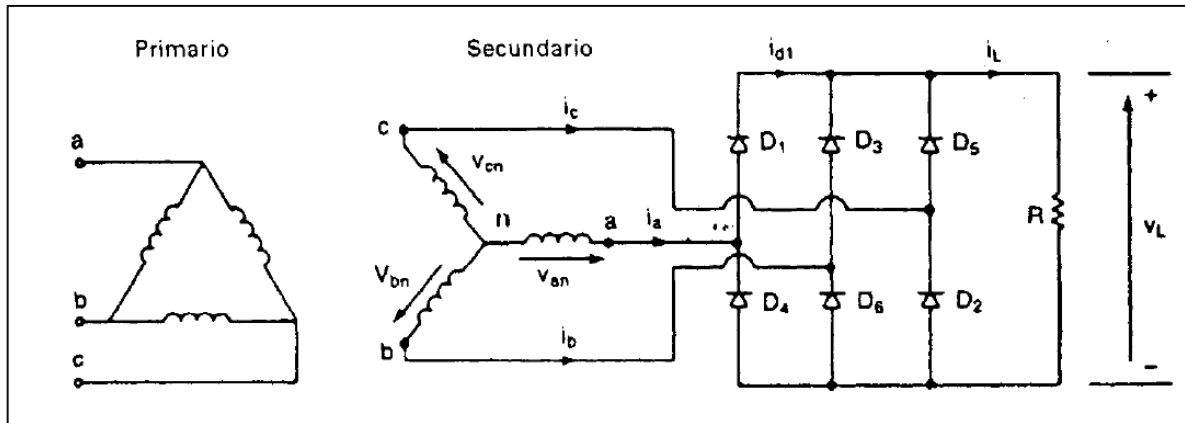


Figura 3.23. Rectificador trifásico tipo puente.¹⁷

La tensión de salida posee cierto rizado, por lo que se colocan condensadores para mantener valor de tensión más constante.

3.3.3 Inversor trifásico

Un inversor trifásico es un sistema que toma la corriente continua y la transforma en corriente alterna trifásica. En un variador de frecuencia, luego de pasar por el rectificador trifásico, la tensión en corriente continua se convierte en una nueva red de tensiones trifásicas, con una tensión y frecuencia variable. La figura 3.24 muestra un diagrama de un inversor trifásico, el cual se compone de una serie de diodos y de transistores de bipolares de compuerta aislada (IGBT).

¹⁷ Figura tomada de (Rashid, 1993), página 71.

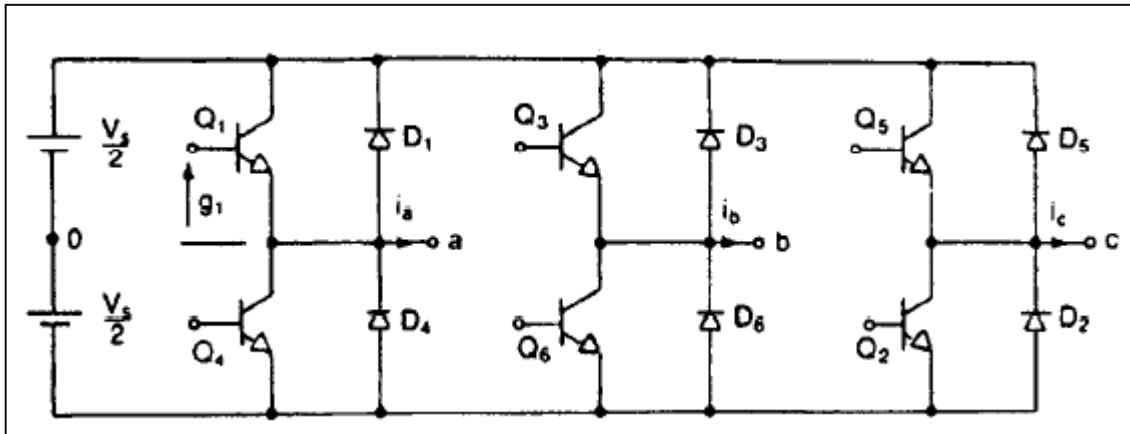


Figura 3.24. Inversor trifásico.¹⁸

La forma de onda deseada a la salida de un inversor es realizada conmutando los transistores IGBT los cuales son controlados por modulación del ancho de pulso (PWM). Esta conmutación la debe realizar un sistema de control (Rashid, 1993).

3.3.4 Relación velocidad lineal y velocidad rotación de un eje

En el movimiento circular, por ejemplo el de un eje cilíndrico, la velocidad lineal se relaciona con el periodo de rotación mediante la siguiente fórmula (Sears, 2006) :

$$v = \frac{2\pi R}{T} \quad (3.2)$$

Donde, v : Velocidad lineal en m/s

R : El radio de la trayectoria circular en m

T : El período de rotación en s.

Además, se sabe que la frecuencia (f) es el inverso del período. Por lo que la ecuación 3.2 puede describirse como:

$$v = 2\pi Rf \quad (3.3)$$

¹⁸ Figura tomada de (Rashid, 1993), página 366.

Ahora cambiando el radio del eje, por su diámetro (D) se tiene:

$$v = \pi D f \quad (3.4)$$

También, sabiendo que 1 Hz = 60 rpm; se obtiene:

$$v = \frac{\pi D}{60} n \quad (3.5)$$

Donde, v : velocidad lineal del eje en m/s.

D : diámetro del eje en m.

n : velocidad de rotación del eje en rpm.

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

En este capítulo se describen las etapas del proceso de diseño en ingeniería seguidas para llegar a la solución del problema.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Luego de varias entrevistas con el Ing. Mauricio Calvo, jefe de producción del área de sub-ensambles en la empresa Boston Scientific, se estableció que la calidad en el recubrimiento con polietileno se mide en términos de su espesor (diámetro del *coil* una vez recubierto) y su homogeneidad (que no existan partes expuestas del acero inoxidable). El primer aspecto es medido automáticamente con el sistema Zumbach, como se detalló en el capítulo anterior. El otro se determina por una inspección visual de cada lote que se produce. Además, el rendimiento productivo de la línea de extrusión se establece en función de la cantidad de *coils* que tiene un recubrimiento de polietileno aceptable.

El problema fue identificado por los operarios y por los ingenieros de producción del área de sub-ensambles, en donde se encuentra la línea de extrusión; ya que la calidad del recubrimiento del *coil*, poco a poco iba decayendo hasta que llegó al punto que no cumplía con sus estándares de calidad y de rendimiento productivo.

Desde la primera visita a la línea de extrusión, se evidenció el problema; ya que en la canoa de producto terminado se encontraban varios catéteres con recubrimientos no homogéneos y áreas del acero inoxidable expuestas. Según el departamento producción del área de sub-ensambles, en promedio se desechaban 500 *coils* por día, de los 14400 que se producen, debido a este problema. Esto equivale a una probabilidad de 96,5% de que el *coil* tenga un recubrimiento aceptable.

El Ing. Mauricio Calvo, señaló que existe sincronización desde el panel del control del eje de tracción principal (eje 4) hacia el tornillo sin fin de la extrusora (eje 3); pero no al contrario. Por lo que se requiere que la sincronización la establezca el eje 3. Además, señaló que los ejes de tracción 1 y 2, no están coordinados; aspecto que se comprobó durante una visita al campo en donde se variaron las velocidades desde el panel de control del eje 4 y desde el panel de control Akcess.

4.2 Obtención y análisis de información

Una vez claro el problema que se debía resolver, se procedió a obtener información. Primeramente se tuvieron varias entrevistas con los operarios de la línea de extrusión, donde manifestaron que al iniciar el proceso de recubrimiento; primeramente se debe limpiar la máquina extrusora y hacer los ajustes de velocidad del tornillo sin fin y de temperatura, para que el polietileno pueda ser vertido de forma correcta. Seguidamente colocan todos los demás módulos en posición y establecen la velocidad del eje de tracción 4 mediante el panel de operador OP7; desde el cual se controla de forma automática la velocidad del eje 3.

Cabe destacar que la línea de extrusión se utiliza para recubrir los *coils* con dos tipos de recubrimiento de diferente espesor, el primero hace que el *coil* tenga un diámetro de 2,36 mm y el segundo de 2,79 mm. Desde las HMI, los operarios pueden escoger el tipo de recubrimiento que se utilizará.

Se tuvieron constantes conversaciones con los ingenieros Mauricio Calvo y Luis Diego Salazar (asesor del proyecto, INGPRO S.A). Se hizo un levantamiento de cada uno de los módulos de la extrusora, para poder caracterizarlos en términos de su función dentro del sistema total. El departamento de producción del área de sub-ensambles, facilitó un manual de la línea de la extrusora, en donde se encontraban los manuales y los planos eléctricos del módulo de máquina extrusora y del panel de control de la extrusora.

Fue necesario estudiar cada uno de los módulos para comprender claramente el funcionamiento y la lógica del proceso de recubrimiento de los *coils*. Para ello se utilizaron las técnicas del diseño modular, donde primero se vio el sistema como uno general y luego se fue dividiendo en módulos más específicos.

Se realizó una investigación bibliográfica para comprender los conceptos relacionados con los variadores de frecuencia y los controladores lógicos programables, tanto de forma general y específicamente los modelos utilizados en la línea de extrusión. Esta investigación se realizó consultando sitios electrónicos mediante el uso de Internet, manuales de usuario, tutoriales en línea, entre otros.

Se evidenció la restricción de la programación actual del PLC no podía ser modificada; pero sí se podían agregar nuevos módulos. Por lo tanto, se investigó cómo agregar un módulo, sin modificar la programación existente.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Como resultado de la búsqueda de información, se concluyó que las deficiencias en la calidad del recubrimiento del *coil*, se deben en gran parte a que el sistema no mantiene una velocidad lineal constante en toda la línea del proceso; esto debido a que no hay coordinación entre varios ejes. También, otra razón es el coeficiente de agarre de cada una de las ruedas de tracción que se encuentran en los ejes.

Existe una red de comunicaciones Profibus DP, a la cual están conectados los cuatro variadores de frecuencia que manejan los ejes del 1 al 4 y el PLC principal. Hay una red MPI para el panel de operador OP7 y otra para la interface del gabinete Akcess (computador).

Es posible agregar un nuevo bloque de función a la programación del PLC s7-300, evaluar ciertas condiciones y por medio de la red Profibus DP, sobrescribir el parámetro que establece la velocidad de cada variador y de esta forma coordinar los demás ejes tomando como referencia el tornillo sin fin de la extrusora.

Para ello se debe conocer la relación matemática existente entre la velocidad lineal del sistema y la velocidad de cada eje; relación que dependen del tipo de recubrimiento que se desee. Normalmente se logra ajustar la velocidad del tornillo sin fin a unos 35 rpm; a éste valor, la velocidad lineal del sistema para el tipo de recubrimiento 1 debe ser de 0,533 m/s y para el tipo 2 de 0,436 m/s¹⁹.

Por lo tanto se establece que el eje de la extrusora sea el que determine la velocidad lineal del sistema y a partir de este parámetro, los demás ejes de tracción ajusten su velocidad de giro. Esta solución tiene la ventaja que no requiere de *hardware* adicional para ser implementada, disminuyendo el costo y aumentando la rapidez en la implementación.

Para mejorar el agarre de las ruedas de los ejes, se puede hacer un desbastado y vulcanizado de las piezas. El módulo del ducto se puede mejorar remplazándolo por un sistema alternativo con un canal y una tapa con bisagras, de forma que se le pueda dar mantenimiento fácilmente.

Los trabajos relacionados directamente con la línea de extrusión, deben hacerse los días sábados de 2:00pm a 6:00pm que es cuando toda la línea queda fuera de servicio.

4.4 Implementación de la solución

En cuanto al procedimiento seguido para la implementación de la solución, primeramente se obtuvo la relación matemática entre la velocidad de giro de cada uno de los ejes y la velocidad lineal del sistema. Para ello se utilizó la relación matemática de la ecuación 3.5, descrita en el capítulo anterior.

Se efectuaron mediciones del diámetro de las ruedas de tracción de cada uno de los ejes y según la velocidad lineal se determinaron las velocidades de giro que deben tener cada uno de los ejes.

¹⁹ Información brindada por el Departamento de producción, Área de sub-ensambles, BSC.

Luego se realizó un *upload* del programa existente en el PLC s7-300 y se analizaron cada uno de los bloques y la interconexión con las entradas y salidas. Se evidenció la existencia de un bloque de función, para cada una de las velocidades de los ejes, que recibe como entrada la velocidad a la que debe girar el eje y su salida es la velocidad a la que debe girar el motor respectivo. Estas funciones ayudaron en la implementación, ya que no fue necesario determinar la relación existente entre la velocidad de giro en el eje del motor y la velocidad de giro en el eje de tracción; aspecto que hubiera sido un proceso engorroso y sujeto a errores debido a los diferentes acoples mecánicos existentes entre los dos ejes.

Se evidenció la presencia de entradas necesarias para que el sistema entre en funcionamiento, tales como la operación del brazo relector, la posición de la canoa de *coils* a recubrir y del tanque de enfriamiento, los interruptores de guarda en la tapa de la extrusora y en el cajón del eje de tracción principal. Por lo que se decidió usar estas entradas como un parámetro que simulara un modo automático en la operación del sistema de tracción.

También dentro de la programación del PLC s7-300, se encuentra una variable que determina el tipo de recubrimiento del *coil*. Esta variable puede ser modificada mediante la HMI del panel de operador OP7 o del panel Akcess. Al entrar en el modo automático, se sobrescribe cada una de velocidades de los ejes de tracción, según el tipo de recubrimiento deseado en el *coil*.

Los proceso de vulcanizado y desbastado de las ruedas de tracción de los ejes y el remplazo del módulo de ducto, no fue realizado debido a que era necesario tener fuera de servicio a la línea más de lo habitual; incluso por varios días; factor que por cuestiones de producción no era rentable al momento de implementar el proyecto.

Finalmente para evaluar el desempeño se realizó un análisis estadístico de la probabilidad de que los *coils* tuvieran un recubrimiento aceptable y se comparó con el estado anterior. También se comparó el desempeño obtenido contra el desempeño deseado. Esto mostró que la solución implementada sí resolvió el problema, ya que se cumplió con lo esperado.

4.5 Revaluación y rediseño

Para mejorar aún más el sistema de arrastre es necesario llevar a cabo el vulcanizado y desbastado de las ruedas de tracción de los ejes, para ello es necesario tener fuera de servicio a toda la línea por varios días, por lo que se puede coordinar de antemano un periodo donde la demanda de producción así lo permita.

También el hecho de remplazar el módulo del ducto por uno alternativo con un canal y una tapa con bisagras, puede ayudar a la coordinación del brazo recolector al colocar sensores a lo largo del ducto. Además de facilitar su limpieza y mantenimiento, evitando que los *coils* se expongan a impurezas o partículas al pasar por de ducto y que sean recubiertos en ese estado, generando un recubrimiento no aceptable.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución (Explicación del diseño)

En este capítulo se detallan cada una de las acciones tomadas para el diseño e implementación del proyecto “Sincronización del sistema de tracción del proceso de recubrimiento con polietileno de los *coils* que conforman los catéteres para la empresa Boston Scientific Costa Rica”. Para dar solución al problema, se tomaron en cuenta los requerimientos de la empresa presentados en el capítulo 1, en la sección 1.2 y a partir de estos se plantearon el objetivo general y los específicos mostrados en el capítulo 2, en las secciones 2.2 y 2.3.

5.1 Análisis de soluciones y selección final

5.1.1 Caracterización del sistema utilizado para recubrir con polietileno los *coils*

En cuanto a la caracterización del sistema, se optó por utilizar la técnica del diseño modular, en donde el sistema se puede subdividir en varios niveles, cada uno con una mayor complejidad que el otro.

En el primer nivel el sistema debe verse como un bloque general de entradas y salidas, como el que se muestra en la figura 5.1.

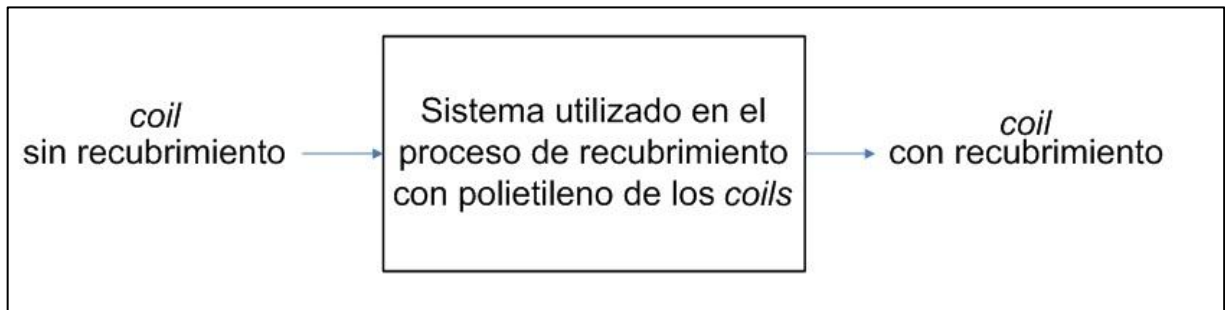


Figura 5.1. Diagrama del bloques de nivel 1 del sistema que recubre los *coils* con polietileno²⁰.

²⁰ Diagrama realizado con el programa Microsoft Office Visio.

Se efectuó un levantamiento tomando en cuenta el funcionamiento y de cada una de los módulos que componen el sistema, para ello se contó con el criterio de los operarios más experimentados en esa línea de producción. De esta forma se llegó al diagrama de bloques de nivel 2, mostrado en la figura 5.2.

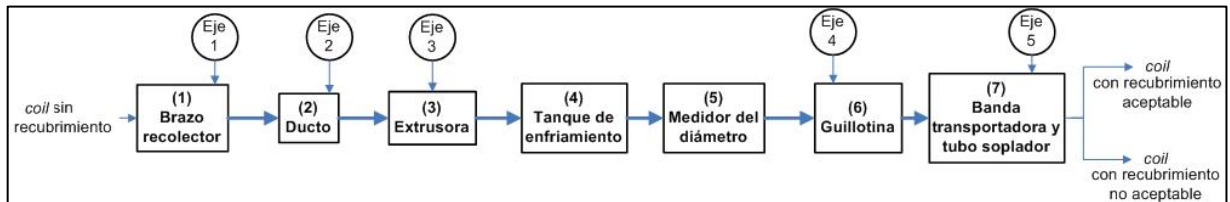


Figura 5.2. Diagrama de bloques de nivel 2 del sistema que recubre los *coils* con polietileno.²¹

En donde se tienen siete módulos principales que conforman el sistema y cinco ejes, de los cuales tres son de tracción (Eje 1, Eje 2 y Eje 4), otro es el tornillo sin fin de la extrusora (Eje 3) y el último es el que mueve la banda transportadora al final de la línea (Eje 4).

Luego cada módulo fue caracterizado internamente y conjuntamente con los demás elementos del sistema. Para ello se revisaron entradas y salidas y los números de serie cada dispositivo. El manual de la extrusora facilitado por el departamento de producción en el área de sub-ensambles, sirvió para corroborar la interconexión entre los sistemas.

Finalmente, se elaboró un documento con toda la caracterización de los módulos que componen el sistema utilizado en el proceso de recubrimiento con polietileno de los *coils* que conforman los catéteres. Parte de ese documento fue incluido en el capítulo 3, en la sección 3.1.

²¹ Diagrama realizado con el programa Microsoft Office Visio.

5.1.2 Mejoras del módulo ducto y las ruedas de tracción

Para mejorar físicamente el módulo de ducto, se escogió la opción de remplazarlo por un canal en acero inoxidable con una cubierta de acrílico y bisagras, de forma tal que fuera fácil de limpiar y ofreciera la posibilidad de colocar sensores a lo largo del trayecto. En el caso de las ruedas de los ejes se eligió hacer un desbastado y un vulcanizado, con lo que se mejoraría su resistencia y coeficiente de fricción, que ayudaría a dar un mejor agarre entre el eje y la línea de *coils* recubiertos.

5.1.3 Sincronización de los ejes de arrastre y el tornillo sin fin de la extrusora

Para la solución del problema, se requería modificar lo menos posible el sistema actual incluyendo la programación del PLC s7-300; por lo que se pensó en aprovechar al máximo los elementos disponibles y sus capacidades.

EL PLC s7-300 disponía de espacio en memoria para poder agregar nuevos bloques de programación y tenía comunicación con las dos HMI (OP7 y Akcess) de la línea de extrusión y los variadores de frecuencia que controlaban la velocidad de los ejes de tracción, mediante las redes MPI y Profibus DP. En las HMI se selecciona el tipo de recubrimiento en el *coil*, variable que era almacenada directamente en el PLC s7-300. En los variadores de frecuencia, el parámetro que establece la velocidad de referencia, podía ser modificado mediante la red Profibus DP.

Por estas razones, se decide modificar la lógica de control de la velocidad de los ejes con la que operaba la línea por una nueva, fundamentado en los siguientes aspectos:

- a. Al inicio, el eje que empieza a operar es el tornillo sin fin de la extrusora (eje 3), el cual se ajusta a un valor de velocidad entre 30 y 37 rpm.
- b. Los ejes de tracción 1 y 2 no están coordinados con los otros ejes. Estos se mantienen girando a velocidad constante.

- c. Desde las interfaces de usuario OP7 y Akses, se selecciona el tipo de recubrimiento (1 o 2) y automáticamente la velocidad lineal de todo el sistema de tracción se establece en 0,533 m/s o en 0,436 m/s y la velocidad de giro del eje 3 en 35 rpm.
- d. Si se requieren hacer ajustes, se puede modificar la velocidad del eje 3 y el eje 4 desde las HMI. Desde el panel OP7 se puede modificar la velocidad del eje 4 y esto cambia automáticamente la velocidad del eje 3. Pero, si desde el panel Akses se modifica la velocidad de giro del eje 3, no se cambia la velocidad del eje 4.

La figura 5.3 muestra un diagrama que ejemplifica la situación anterior del sistema. Desde la HMI OP7 se podía modificar la velocidad del eje 4 e indirectamente el eje 3 variaba su velocidad. Pero desde la HMI Akses sólo se podía modificar la velocidad del eje 3.

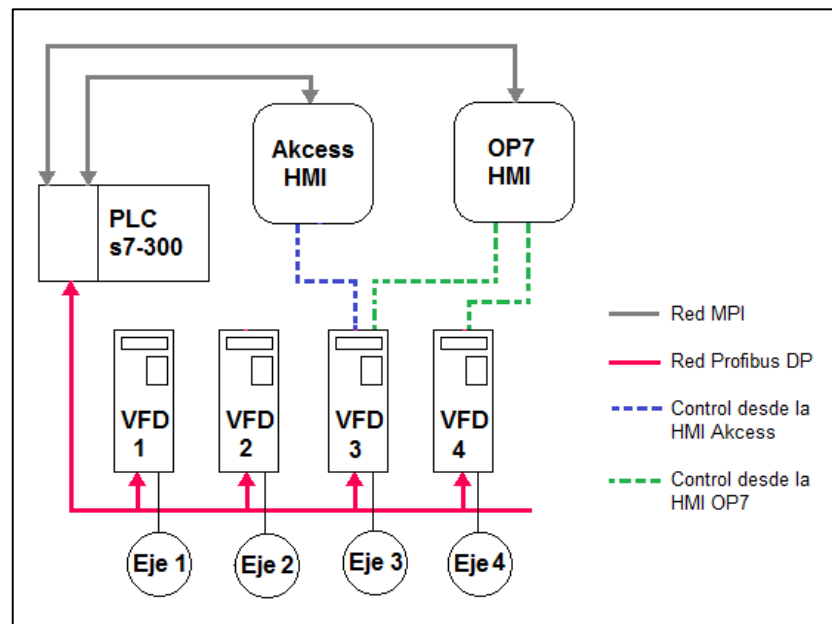


Figura 5.3. Diagrama del estado anterior de las redes y el control mediante las HMI²².

²² Diagrama realizado con el programa Paint

Ahora bien, se tienen varias opciones para establecer cuál eje será el que controle la velocidad de la extrusora y que los demás funcionen como un seguidor de la velocidad de ese eje. Los dos primeros ejes se descartan ya que su velocidad no puede ser modificada mediante ningún panel. Entre los otros dos restantes, se escoge el 3; ya que es el primero que empieza a funcionar cuando se enciende la máquina extrusora y es donde se hacen los ajustes de velocidad para que el polietileno pueda ser vertido correctamente en la superficie del *coil*.

Se simula un modo automático evaluando una serie de condiciones, en el cual la velocidad del eje 3 gobierna la velocidad de los demás ejes sobrescribiendo el valor de la velocidad de referencia. En la figura 5.4 se muestra un diagrama de la lógica de control implementada en el modo automático, en este estado se puede modificar al velocidad del eje 3 desde el panel Akcess y cualquier modificación de las velocidades que se haga en la HMI OP7 no tendrá efecto.

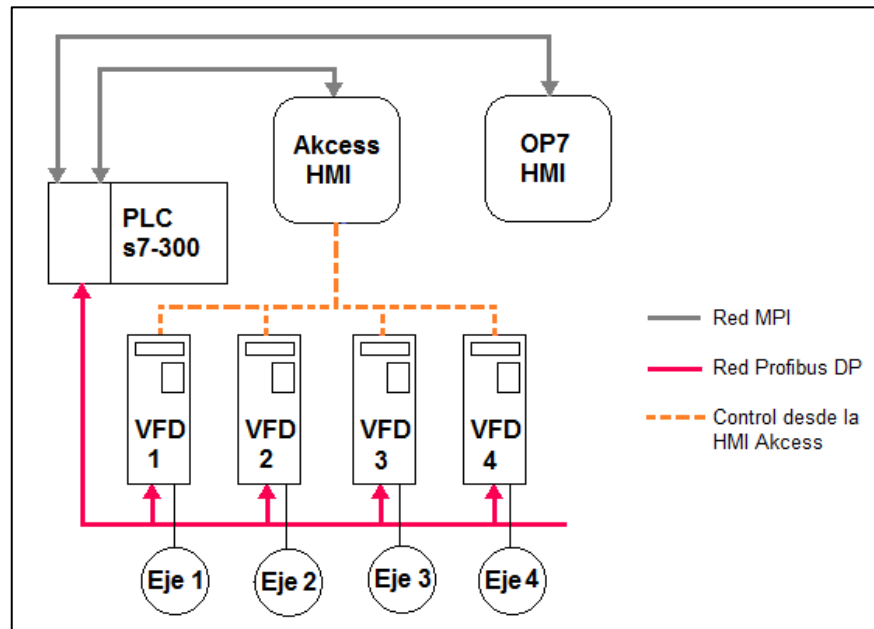


Figura 5.4. Diagrama del estado implementado en el modo automático de las redes y el control mediante las HMI.²³

²³ Diagrama realizado con el programa Paint

5.1.4 Estimación de la mejora alcanzada en la calidad del recubrimiento

En este caso, el departamento de producción del área de sub-ensambles sugirió tomar lotes aleatorios del producto y cuantificar aquellos que tuvieran un recubrimiento no aceptable. Si el defecto es el ancho del recubrimiento, éste se detectará automáticamente por el sistema de medición del diámetro.

Sin embargo, para tener una mayor certeza de la calidad del recubrimiento, se propuso realizar inspecciones visuales a cada uno de los *coils* del lote seleccionado. Cada lote de *coils* a recubrir se compone de 250 unidades.

De esta forma, tomando varias muestras aleatorias y cuantificando la cantidad de *coils* que cuentan con un recubrimiento aceptable; se puede estimar la probabilidad de que un *coil* cualquiera cumpla con los estándares de calidad.

5.2 Descripción del hardware

El hardware requerido para la implementación del proyecto, es el mismo con el que ya cuenta el sistema de recubrimiento. Los módulos más importantes son los el PLC s7-300, la red Profibus DP, las HMI OP7 y Akcess, los variadores de frecuencia y los motores de cada eje de tracción y el tornillo sin fin de la extrusora. Sin embargo, para la programación fue necesario utilizar un cable adaptador entre la PC y el PLC s7-300.

5.2.1 PLC Siemens Simatic s7-300

El PLC utilizada para implementar la solución es el Siemens Simatic s7-300, mostrado en la figura 5.5 y es el controlador principal de toda la línea de extrusión. Se encuentra en el gabinete de control de la extrusora. En la figura pueden observarse los cables de la red Profibus DP en color morado.



Figura 5.5. PLC Siemens Simatic s7-300, utilizado para implementar la solución.

Además, para hacer el *upload* de la programación original del PLC y luego el *download* con el nuevo bloque de función agregado, fue necesario utilizar un cable adaptador para computadora, ya que el puerto de programación del s7-300 es serie y la mayor parte de las computadoras actuales no disponen de este tipo de puerto. En la figura 5.6, se muestra el cable convertidor de USB a serie utilizado.



Figura 5.6. Simatic PC Adapter USB²⁴.

²⁴ Figura tomada de <http://www.automationengineering.co.uk/wp-content/uploads/2012/08/s7-pc-adapter.jpg>

5.2.2 HMI Akcess y OP7

Las interfaces HMI con las que cuenta la línea de extrusión son Akcess y OP7 y se muestran en la figura 5.7. Mediante estas interfaces los operarios pueden escoger el tipo de recubrimiento deseado y luego desde la HMI Akcess, realizar ajustes en la velocidad del tornillo sin fin de la extrusora.



Figura 5.7. Interfaces HMI Akcess y OP7.

5.2.3 Variadores de frecuencia que controlan los motores

Los variadores de frecuencia que controlan la velocidad de cada uno de los motores son los que se muestran en la figura 5.8. Todos son de la marca Siemens, el VFD 1 es un Micromaster 6SE3214-0DA40 y los demás son Simovert VC 6SE7016-1EA61-Z.



Figura 5.8. Variadores de frecuencia que controlan cada uno de los motores.

5.2.4 Motores que mueven cada eje

La figura 5.9 muestra los motores utilizados para mover cada uno de los ejes de la línea de extrusión.

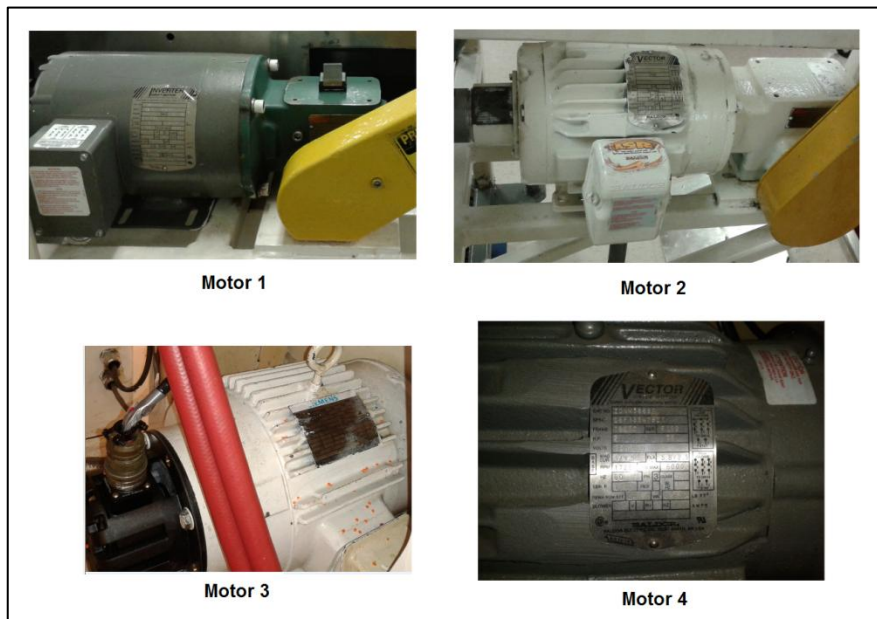


Figura 5.9. Motores de inducción que mueven cada uno de los ejes en la línea de extrusión.

En la tabla 5.1 se muestra la marca, el modelo y las características eléctricas de cada uno de los motores encargados de mover los diferentes ejes del sistema de tracción. Todos estos ejes disponen de algún acople mecánico con el eje del motor; por lo que la velocidad a la que gira el motor no es la misma del eje. Los datos fueron tomados de las placas de los motores y del manual de la extrusora (Boston Scientific Symbiosis, 2000). El eje 5 se mueve mediante un motor CD y no se ve involucrado directamente en el sistema de tracción y arrastre de los *coils*; por lo que no se incluye en la tabla.

Tabla 5.1. Características eléctricas de los motores que mueven cada eje.

Motor / Eje	Marca	Modelo	Tensión (VAC 3 fases)	Potencia (HP)	Velocidad nominal (rpm)	Frecuencia (Hz)
1	Baldor Electric	IDNM3538	230 / 460	0,5	1725	60
2	Baldor Electric	ZDNM 3581T	230 / 480	3	1725	60
3	Siemens	6B782 PHPS 8028DP	230 / 460	3	1700	60
4	Baldor Electric	ZDNM 3969T	230 / 480	2	1800	

En la tabla 5.2 se muestran la marca del *encoder* de cada motor y el respectivo variador de frecuencia que lo controla. Estos datos fueron obtenidos del manual de la extrusora.

Tabla 5.2. *Encoder* y variador de frecuencia de cada uno de los motores del sistema de recubrimiento.

Motor	<i>Encoder</i>		Variador de frecuencia		
	Marca	Serie	Marca	Modelo	Serie
1	Encoder Division	X006847	Siemens	Micromaster	6SE3214-0DA40
2	Encoder Division	X006847	Siemens	Simovort VC	6SE7016-1EA61-Z
3	Encoder Division	X006847	Siemens	Simovort VC	6SE7016-1EA61-Z
4	Sumtak	LEI-037-2500CE	Siemens	Simover VC	6SE7016-1EA61-Z

5.2.5 Diagrama de las redes de comunicaciones Profibus DP y MPI

La figura 5.10 contiene el diagrama de las redes de comunicaciones Profibus DP y MPI, con la que cuenta la línea de extrusión. Este diagrama fue tomado del *upload* que se hizo de la programación del PLC s7-300, mediante el *software* SIMATIC Manager, en la sección de *connections* y visualizado en la ventana NetPro.

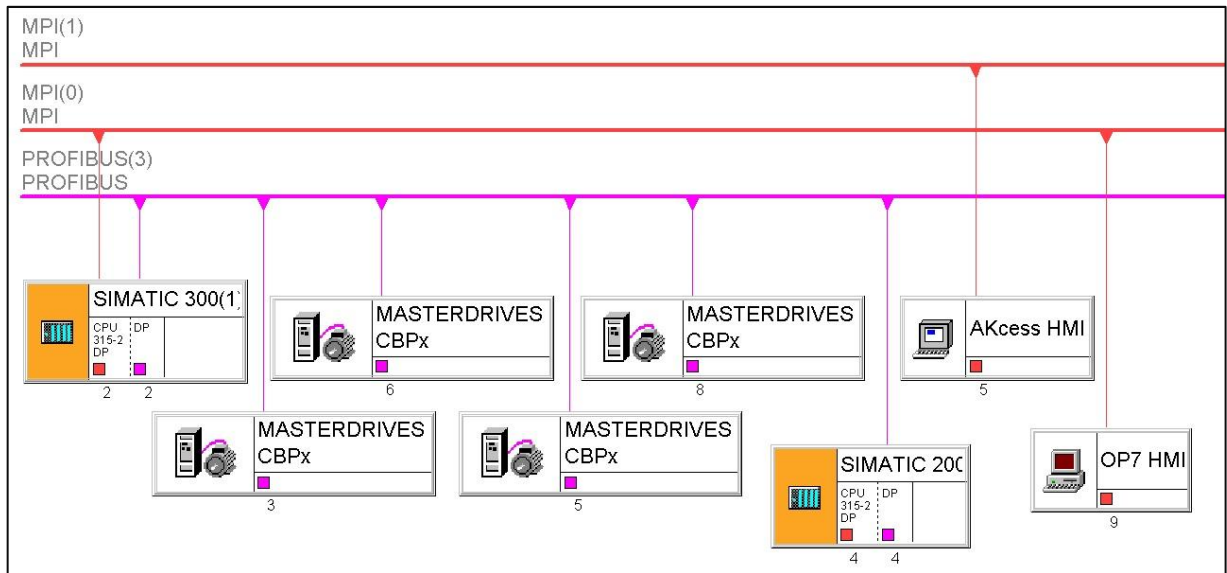


Figura 5.10. Conexiones de los periféricos a las redes Profibus DP y MPI.²⁵

La red Profibus cuenta con una velocidad de 1,5 Mbps y es del tipo DP (*Decentralized Peripherals*). Las redes MPI están configuradas a una velocidad de transferencia de 187,5 kbps

Puede verse como cada uno de los variadores de frecuencia está conectado al PLC s7-300 mediante la red Profibus DP, así como el PLC s7-200 que controla la operación del brazo neumático el cual funciona como esclavo. Las dos HMI Akcess y OP7 están conectadas mediante la red MPI y pueden modificar variables directamente en el PLC s7-300. Además cada uno de los periféricos tiene asignada una única dirección o *ID*, que es la usada para establecer la comunicación con ese dispositivo.

5.2.6 Relación matemática entre la velocidad de giro de cada eje y la velocidad lineal del sistema

La tabla 5.3 muestra el diámetro mínimo que debe tener el *coil* una vez recubierto según el tipo de recubrimiento que se desea.

²⁵ Captura realizada desde el programa Step 7

Tabla 5.3. Diámetro mínimo del *coil* según el tipo de recubrimiento deseado

Tipo de recubrimiento	Diámetro mínimo del <i>coil</i> (mm)
1	2,36
2	2,79

Considerando que el eje de la extrusora gira a 35 rpm, la velocidad lineal que debe mantener el sistema de tracción para que el *coil* tenga un recubrimiento del tipo 1 o 2, es la que se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Velocidad lineal para cada tipo de recubrimiento para el caso en el que la velocidad del eje 3 sea de 35 rpm.

Tipo de recubrimiento	Velocidad lineal (m/s)
1	0,533
2	0,436

Puede notarse en las tablas 5.3 y 5.4, como a menor velocidad lineal, manteniendo constante la velocidad del tornillo sin fin, se logra un mayor espesor del recubrimiento evidenciado en un mayor diámetro del *coil* recubierto.

La relación entre la velocidad lineal de la línea de extrusión (V_L) y la velocidad de giro del eje 3 (n_3), según el tipo de recubrimiento que se desea en el *coil*; se muestra en el gráfico de la figura 5.11.

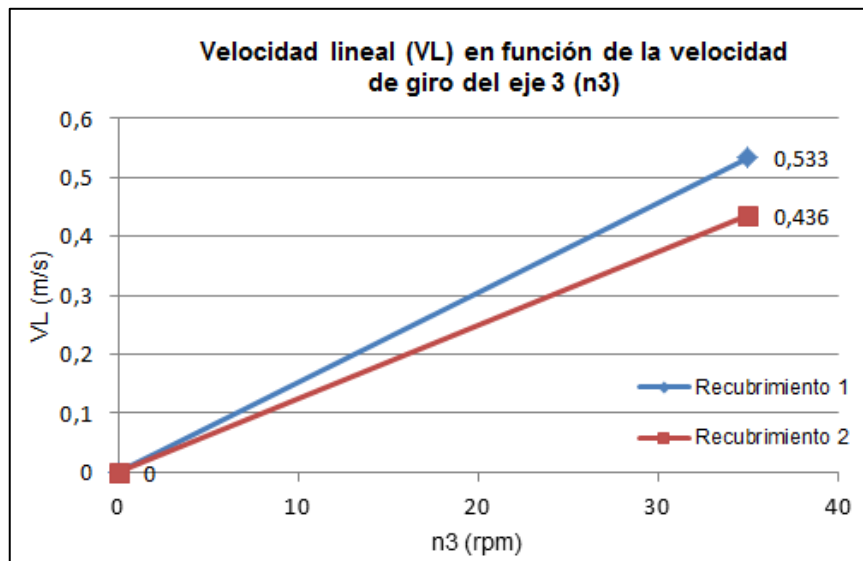


Figura 5.11. Gráfico de la velocidad lineal (V_L) en función de la velocidad de giro del eje 3 (n_3).²⁶

A partir de esta gráfico, se puede sacar la relación matemática existente entre V_L y n_3 ; según el tipo de recubrimiento. Estas relaciones son las siguientes:

Para el tipo de recubrimiento 1:

$$V_L = 0,01523 n_3 \quad (5.1)$$

Para el tipo de recubrimiento 2:

$$V_L = 0,01246 n_3 \quad (5.2)$$

Por otra parte, la ecuación 3.5 (capítulo 3, sección 3.3.4) se presentó la relación que existe entre la velocidad lineal y la velocidad de giro en un eje de un diámetro específico. Si se toma esa ecuación y se despeja la velocidad de giro se obtiene la siguiente relación:

$$n = \frac{60}{\pi D} v \quad (5.3)$$

²⁶ Gráfico realizado con el programa Microsoft Excel

Donde, v : velocidad lineal del eje en m/s.

D : diámetro del eje en m.

n : velocidad de rotación del eje en rpm.

Luego, los diámetros de las ruedas de tracción de los ejes fueron medidos utilizando un vernier, estos datos se muestran la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Diámetro de las ruedas de tracción de los ejes 1, 2 y 4.

Eje	Diámetro (m)
1	0,020
2	0,052
4	0,085

Tomando estos valores de diámetro y sustituyéndolo en la ecuación 5.3, se obtiene la relación matemática entre la velocidad de giro y la velocidad lineal del sistema para cada eje de tracción.

Eje 1:

$$n_1 = 954,93 V_L \quad (5.4)$$

Eje 2:

$$n_2 = 367,28 V_L \quad (5.5)$$

Eje 4:

$$n_4 = 224,69 V_L \quad (5.6)$$

5.2.7 Relación matemática entre la velocidad de giro de cada eje de tracción y la velocidad de giro del eje 3

Es conveniente encontrar una relación matemática entre la velocidad de giro de cada eje de tracción (eje 1, eje 2 y eje 4) y la velocidad de giro del eje 3. Esto para que los otros ejes sigan directamente la velocidad del eje 3, cuando se entre en el modo automático.

Esta relación se encuentra al sustituir ya sea la ecuación 5.1 o 5.2, dependiendo del tipo de recubrimiento, en las ecuaciones 5.4, 5.5 y 5.6. Con lo cual se obtiene:

Tipo de recubrimiento 1:

$$n_1 = 14,54 n_3 \quad (5.7)$$

$$n_2 = 5,59 n_3 \quad (5.8)$$

$$n_4 = 3,42 n_3 \quad (5.9)$$

Tipo de recubrimiento 2:

$$n_1 = 11,90 n_3 \quad (5.10)$$

$$n_2 = 4,58 n_3 \quad (5.11)$$

$$n_4 = 2,80 n_3 \quad (5.12)$$

5.3 Descripción del software

La programación del controlador lógico Siemens Simatic s7-300 se realiza mediante el lenguaje de escalera, en el *software* Step 7. Como se mencionó anteriormente, primeramente se efectuó un *upload* de la programación que tenía el PLC originalmente. Dentro de la programación se ubicaron las variables correspondientes al tipo de recubrimiento, el estado del brazo recolector, los interruptores de seguridad y de la posición de la canoa de *coils* a recubrir y el tranque de enfriamiento y la velocidad de cada uno de los ejes de la línea de extrusión.

El tipo de recubrimiento es una variable que se modifica mediante cualquiera de las interfaces HMI conectadas mediante la red MPI. El estado del brazo recolector es leído del PLC s7-200 por el controlador s7-300, mediante la red Profibus DP y se almacena en una variable interna del controlador. Los interruptores de las guardas de la guillotina y del cajón del eje de tracción principal (eje 4), corresponden a entradas directas del PLC s7-300; así como los interruptores de la posición de la canoa de *coils* a recubrir y del tanque de enfriamiento.

Las variables de la velocidad de giro de cada eje de la línea de extrusión se manejan a nivel de la memoria interna del controlador y pueden ser modificadas con las interfaces HMI. Luego, se determina la frecuencia con la que deben girar los motores, según la relación existente entre los dos ejes, que depende del acople mecánico entre ellos y se encuentra en otros bloques de función.

De esta forma, las frecuencias de giro de los motores se escriben en los parámetros de frecuencia de referencia de cada uno de los variadores, mediante la red Profibus DP. Estos parámetros corresponden al P1300, para el variador Micromaster y P443, para el variador Simovert; para ello se debe tener en cuenta la dirección Profibus de cada variador, las cuales son 3, 5, 6 y 8 para los VFD 1, VFD 2, VFD 3 y VFD 4 respectivamente.

En la tabla 5.6 se muestra cada una de las variables, su símbolo o etiqueta utilizada en la programación, el tipo de variable y la descripción de sus valores.

Tabla 5.6. Símbolo, tipo y valores de las variables utilizadas en la programación del bloque agregado al PLC s7-300.

Variable	Símbolo	Tipo	Valores
Tipo de recubrimiento	Coating_typ	Booleana	0: Tipo 1 1: Tipo 2
Estado del brazo	Feeder_sts	Booleana	0: Detenido 1: Funcionando
Interruptor guarda de la guillotina	Cutter_sav	Booleana	0: Guarda abierta 1: Guarda cerrada
Interruptor guarda del eje 3	Puller_sav	Booleana	0: Guarda abierta 1: Guarda cerrada
Interruptor posición de la canoa de coils a recubrir	Canoe_pos	Booleana	0: Fuera de posición 1: En posición
Interruptor posición del tanque de enfriamiento	Tank_pos	Booleana	0: Fuera de posición 1: En posición
Velocidad del eje 1	Shaft1_vel	Entero 16 bits	rpm
Velocidad del eje 2	Shaft2_vel	Entero 16 bits	rpm
Velocidad del eje 3	Shaft3_vel	Entero 16 bits	rpm
Velocidad del eje 4	Shaft4_vel	Entero 16 bits	rpm

Tomando en cuenta estas variables y su mapeo respectivo dentro del PLC, se crea un nuevo bloque de función que al cumplirse las condiciones del modo automático, modifica la velocidad de rotación los ejes de tracción; según el tipo de recubrimiento y la velocidad de giro del tornillo sin fin de la extrusora (eje 3) y tomando en cuenta las relaciones matemáticas de las ecuaciones 5.7 a 5.12, descritas en la sección anterior.

En la figura 5.12 se ilustra el diagrama de flujo del bloque de función agregado al *software* del PLC.

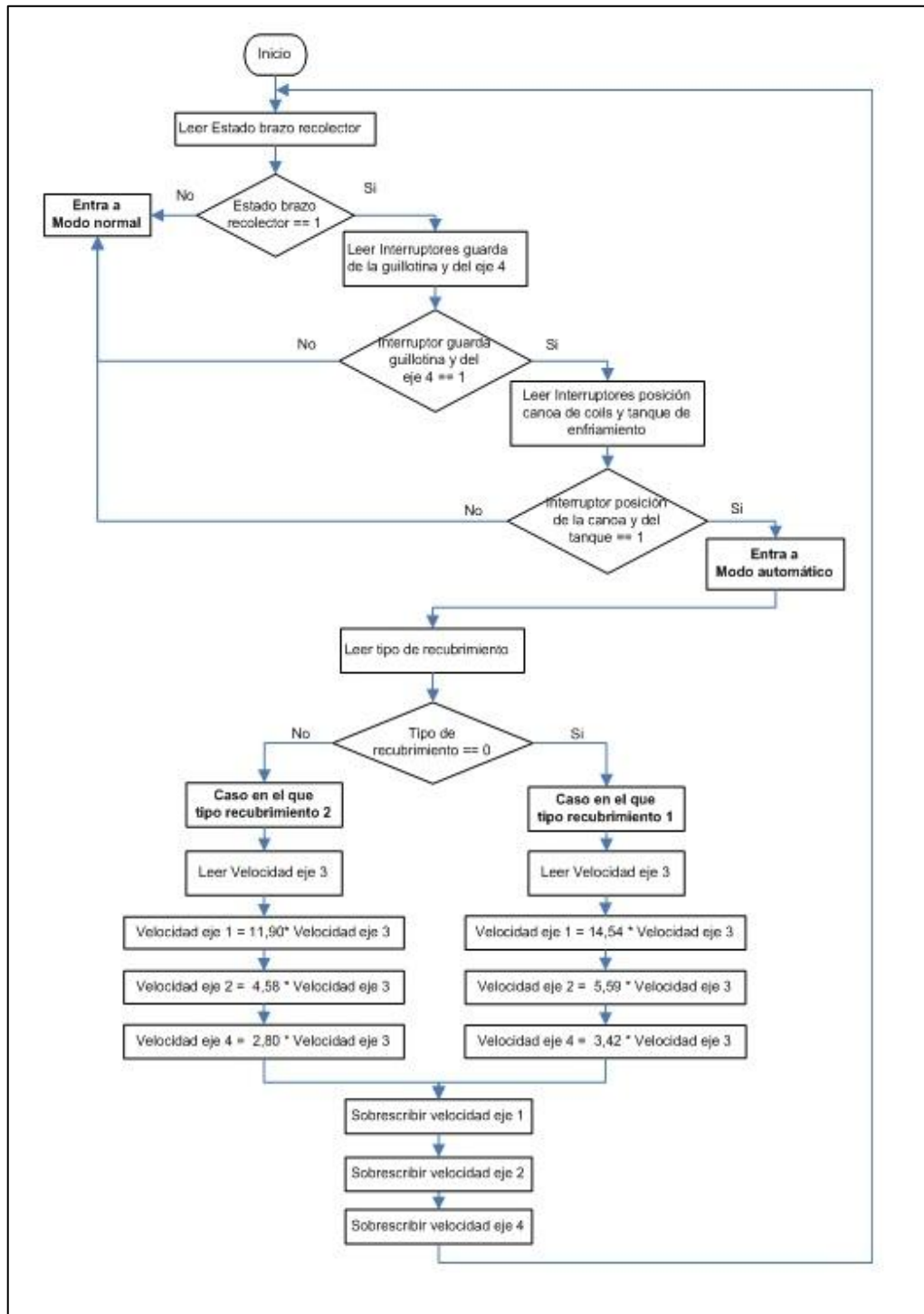


Figura 5.12. Diagrama de flujo del bloque de programación agregado al PLC s7-300²⁷.

²⁷ Diagrama realizado con el programa Microsoft Visio

Capítulo 6: Análisis de Resultados

La meta del proyecto fue aumentar la calidad del recubrimiento de polietileno de los *coils* que conforman los catéteres, sincronizando los ejes de arrastre de la línea de extrusión y mejorando físicamente el ducto y las ruedas tracción de los ejes. Para ello se modificó la programación del controlador principal y se estableció la velocidad de cada eje en función del eje de la máquina extrusora.

La calidad del recubrimiento del *coil* se cuantifica en términos de su diámetro (espesor del recubrimiento) y de su homogeneidad (que no se encuentren áreas expuestas del acero inoxidable). Por esta razón, los resultados involucran un análisis estadístico de la calidad del recubrimiento en varios lotes de *coils*; con el fin de obtener la probabilidad de que el recubrimiento de un *coil* sea aceptable según los estándares de calidad.

Además es necesario hacer un análisis de la situación anterior y la actual, con el fin de determinar las ganancias económicas generadas al implementar este proyecto.

6.1 Resultados

El sistema de coordinación si puede ser implementado, al agregar un nuevo bloque de función al PLC s7-300 que sobrescribe la velocidad de cada eje de tracción a partir de la velocidad de giro del eje de la extrusora. Sin embargo, las mejoras físicas en el sistema de arrastre no se pudieron implementar al momento de la realización de éste proyecto.

Éstas mejoras contemplaban el remplazo del módulo de ducto por un sistema alternativo con canal en acero inoxidable y una cubierta de acrílico con bisagras y el desbastado y vulcanizado de las ruedas de tracción de los ejes 1, 2 y 4. La razón de que no se pudieran implementar se debió a que para efectuar estas mejoras, se requerían varios días; en los cuales toda la línea de extrusión debía estar fuera de servicio y por razones productivas, en esta temporada no se podía llevar a cabo ese paro.

Una vez implementada la solución, se procedió a hacer un estudio estadístico de la cantidad de *coils* que contaban con un recubrimiento homogéneo. Para ello se seleccionaron aleatoriamente diez lotes de *coils*, de 250 unidades cada uno; para cada tipo de recubrimiento y se cuantificaron la cantidad de *coils* que se desechaban automáticamente por el sistema de medición del diámetro. Además se realizó una inspección visual para poder determinar la presencia de zonas expuestas del acero inoxidable del *coil*.

Para el tipo de recubrimiento 1, que es el de menor espesor (diámetro 2,36 mm), los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.1 y para el tipo 2 (diámetro 2,79 mm), en la tabla 6.2. Se tomaron 10 muestras de lotes de forma aleatoria y se contabilizaron la cantidad de *coils* con defectos y con un recubrimiento aceptable

Tabla 6.1. Cantidad de *coils* con un recubrimiento no aceptable y aceptable para diez lotes de producto escogidos de forma aleatoria, para el tipo de recubrimiento 1

Número de lote	Cantidad de <i>coils</i> desechados por un ancho menor a 2,36 mm	Cantidad de <i>coils</i> desechados por áreas expuestas	Cantidad de <i>coils</i> con recubrimiento aceptable
1	3	0	247
2	2	2	246
3	2	0	248
4	3	0	247
5	3	1	246
6	4	0	246
7	2	0	248
8	5	0	245
9	3	1	246
10	4	0	246

Tabla 6.2. Cantidad de *coils* con un recubrimiento no aceptable y aceptable para diez lotes de producto escogidos de forma aleatoria, para el tipo de recubrimiento 2

Número de lote	Cantidad de <i>coils</i> desechados por un ancho menor a 2,79 mm	Cantidad de <i>coils</i> desechados por áreas expuestas	Cantidad de <i>coils</i> con recubrimiento aceptable
1	3	0	247
2	3	0	247
3	5	1	244
4	3	0	247
5	4	1	245
6	2	0	248
7	3	2	245
8	2	0	248
9	2	0	248
10	3	0	247

Con base en las tablas anteriores, se puede graficar la cantidad de *coils* desechados por un ancho menor al indicado y por tener áreas expuestas en función del número de lote, para cada tipo de recubrimiento. Estos gráficos se muestran en las figuras 6.1 y 6.2.

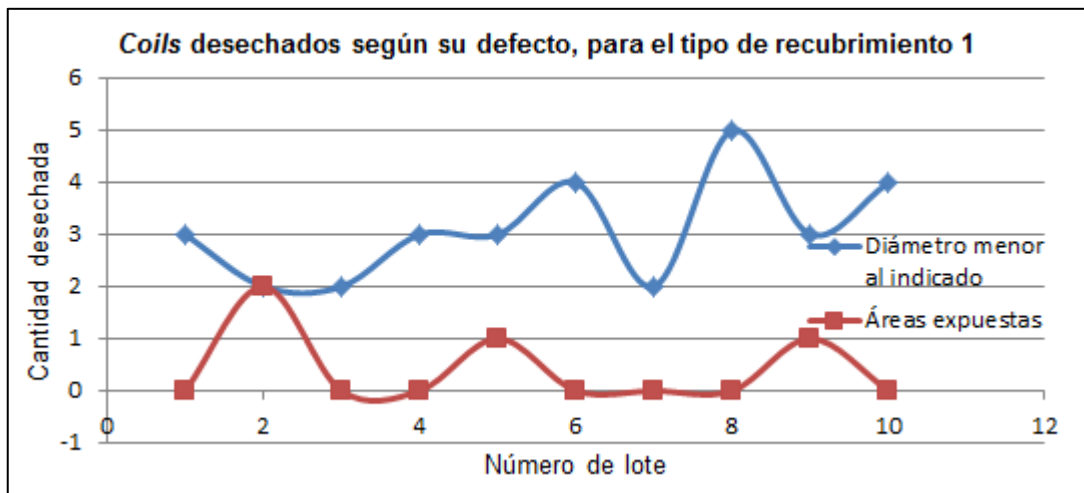


Figura 6.1. Coils desechados según su defecto, para el tipo de recubrimiento 1²⁸.

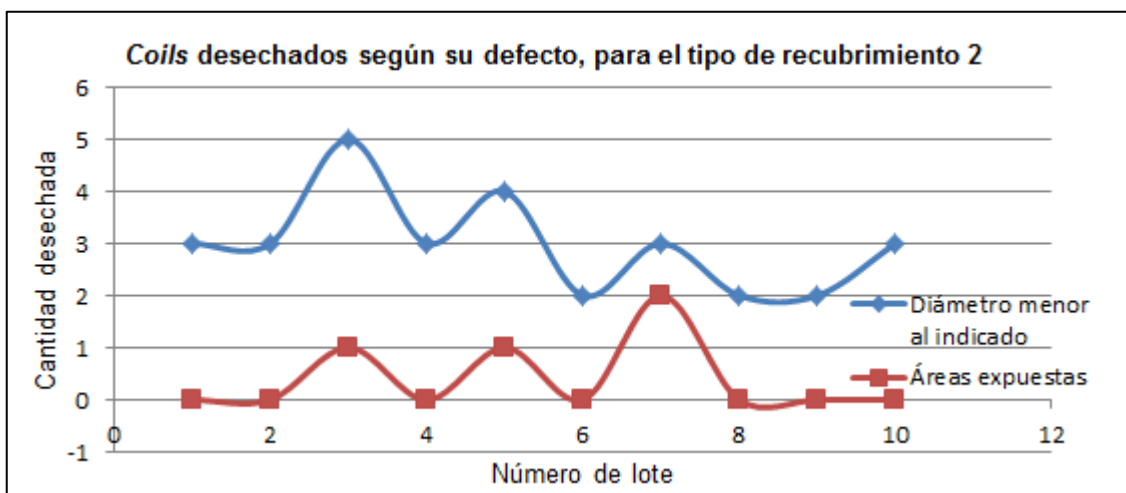


Figura 6.2. Coils desechados según su defecto, para el tipo de recubrimiento 2²⁹.

A partir de las tablas 6.1 y 6.2 y utilizando la herramienta de estadística descriptiva del programa Microsoft Excel, se pueden obtener los valores de la media, mediana, moda, desviación estándar, entre otros; para la cantidad de coils con recubrimiento aceptable. Estos valores se muestran en la tabla 6.3.

²⁸ Gráfico realizado con el programa Microsoft Excel

²⁹ Gráfico realizado con el programa Microsoft Excel

Tabla 6.3. Análisis estadístico de la cantidad de *coils* con recubrimiento aceptable

Parámetro	Tipo de recubrimiento 1	Tipo de recubrimiento 2
Media	246,5	246,6
Error típico	0,30731815	0,45215533
Mediana	246	247
Moda	246	247
Desviación estándar	0,97182532	1,42984071
Varianza de la muestra	0,94444444	2,04444444
Rango	3	4

Al promediar los dos valores medios, se obtiene que de los 250 *coils* que conforman los catéteres, en promedio 246,55 cuentan con un recubrimiento aceptable. Con base en este dato, se puede modelar la probabilidad de obtener un *coil* con un recubrimiento aceptable, que resulta ser de 98,62%.

También es necesario realizar un análisis económico para evaluar los beneficios obtenidos al implementar la solución, en comparación con el estado anterior. La tabla 6.4 muestra datos del costo de producción de cada *coil* recubierto, el tiempo que tardan en producirse, la cantidad que se producen por hora, día y mes; todos estos valores fueron facilitados por el departamento de producción del área de sub-ensambles.

Tabla 6.4. Costo, tiempo que tarda y cantidad de *coils* que se recubren por hora, día y mes

Descripción	Valor / Cantidad
Costo de producción del <i>coil</i> con recubrimiento (\$)	0,8
Tiempo que tarda un <i>coil</i> en recubrirse (s)	5
<i>Coils</i> que se recubren por hora	720
<i>Coils</i> que se recubren por día (20 h)	14400
<i>Coils</i> que se recubren por mes (28 días)	403200

Con los datos mostrados en la tabla 6.4 es posible estimar las pérdidas económicas que existía antes y las que hay después de haber implementado la solución. Estos valores se muestran en la tabla 6.5.

Tabla 6.5. Costo, tiempo que tarda y cantidad de *coils* que se recubren por hora, día y mes

Parámetro	Situación anterior	Situación actual	Diferencia
Probabilidad de que el recubrimiento del <i>coil</i> sea aceptable (%)	96,5	98,62	2,12
Probabilidad de que el recubrimiento del <i>coil</i> no sea aceptable (%)	3,5	1,38	-2,12
Cantidad promedio de <i>coils</i> desechados por mes	14112	5565	-8547
Pérdidas económicas mensuales (\$)	11 290	4 452	- 6 837

Para tener una mejor percepción del estado anterior y el actual, se graficó la probabilidad de que el recubrimiento del *coil* sea aceptable y las pérdidas económicas mensuales, estos gráficos se muestran en las figuras 6.3 y 6.4

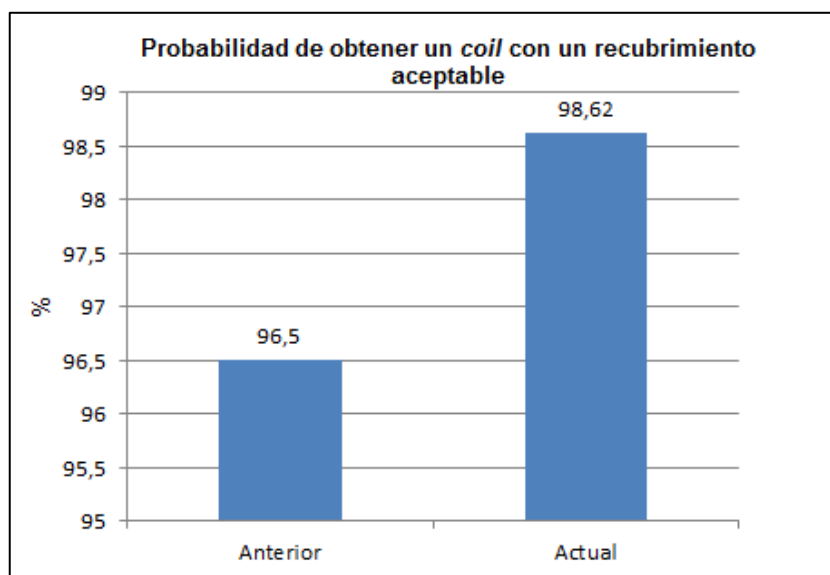


Figura 6.3. Situación anterior y actual de la probabilidad de obtener un *coil* con recubrimiento aceptable³⁰.

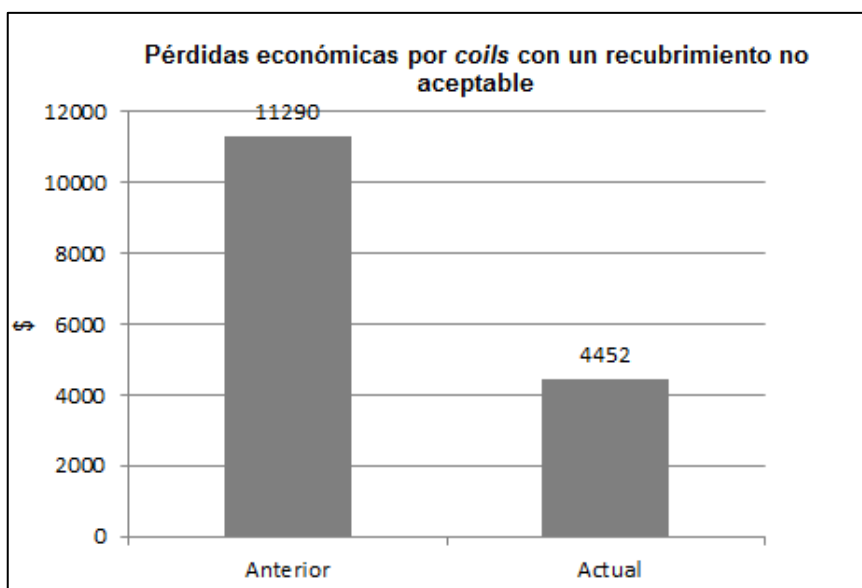


Figura 6.4. Situación anterior y actual de las pérdidas económicas por *coils* con un recubrimiento no aceptable³¹.

³⁰ Gráfico realizado con el programa Microsoft Excel.

³¹ Gráfico realizado con el programa Microsoft Excel.

Se realizó un análisis de flujo de caja para cada período (mes), tomando en cuenta la inversión inicial del proyecto, que corresponde al precio que cobró la empresa INGPRO S.A por la realización del proyecto, que es de \$ 7850. El flujo de caja para cada periodo, corresponde a la cantidad de dinero ahorrada en las pérdidas, la cual es de \$ 6837. Los flujos descontados (FD), se calcularon con base en un costo promedio ponderado de capital (K) de 20% anual.

Con base en estos datos se calculó el periodo de recuperación (PR) de la inversión inicial (Io), según la fórmula (Sapag Nassir, 2007):

$$PR = \# \text{ de periodos antes de cubrir } I_o + \frac{\text{Monto no cubierto antes de alcanzar } I_o}{\text{FD del periodo en que se cubre } I_o} \quad (6.1)$$

En la figura 6.5 se muestra el análisis del flujo de caja y el periodo de recuperación de la inversión inicial, el cual es de 1 mes y 4 días de producción normal de la línea de extrusión.

	Io (\$)	-7850	FD (\$)	FD acumulado (\$)	Recuperación Io (%)
Flujo de Caja 1 (\$)	6837		6724,9	6724,9	85,7
Flujo de Caja 2 (\$)	6837		6837,0	13561,9	172,8
K	2%				
PR=	1,082958912				
PR=	1 mes y 3 días				

Figura 6.5. Análisis del flujo de caja y periodo de recuperación de la inversión inicial del proyecto³²

³² Captura hecha desde el programa Microsoft Excel

6.2 Análisis

Los gráficos de las figuras 6.1 y 6.2, muestran que los defectos en el recubrimiento de polietileno de los *coils*, se deben principalmente a un diámetro menor al indicado y no a áreas expuestas. Esto hecho presenta una ventaja en la detección de los *coils* con un mal recubrimiento, ya que el sistema de medición de diámetro desecha automáticamente cualquier *coil* que no disponga del diámetro requerido. Las inspecciones visuales para determinar áreas expuestas serán menos engorrosas sabiendo que la mayor cantidad de *coils* con defectos en el recubrimiento ya fue desechada.

Según los valores del análisis estadístico de la tabla 6.3; el comportamiento de la cantidad de *coils* con un recubrimiento aceptable presenta las siguientes características:

- Un ligero sesgo hacia la izquierda (negativo) para el caso del tipo recubrimiento 1, ya que la media es mayor que la mediana y la moda ($246,5 > 246$). Para el caso del tipo de recubrimiento 2, el sesgo es hacia la derecha (positivo), ya que la media es menor que la mediana y la moda ($246,6 < 247$). En ambos casos; como estos tres valores son muy similares, se puede concluir que la distribución es prácticamente simétrica.
- La desviación estándar y la varianza muestran que para el caso del recubrimiento tipo 2 los datos obtenidos se alejan más del promedio. Aproximando la distribución de los datos a una normal, aproximadamente el 95% estarán dentro del rango de ± 2 desviaciones estándar respecto a la media. [cita] Esto quiere decir que el 95% de los lotes de *coils* con el recubrimiento tipo 1, tendrán una cantidad de *coils* aceptables entre los 244,56 y 248,44; mientras que los de tipo 2 entre 243,74 y 249,46. Puede notarse que aunque las desviaciones son bastantes diferentes entre sí, su valor es muy pequeño en comparación con la media; por lo que se concluye que la media si en un valor que representa la tendencia de los valores la muestra.

- Los rangos son muy parecidos (3 y 4); por lo que la diferencia entre el valor máximo y mínimo es similar para cada tipo de recubrimiento. Esto indica que no hay presencia de valores extremos.

Con base en éste análisis, se puede tomar la media como un valor que describe la tendencia de la variable aleatoria, que en este caso corresponde a la cantidad de *coils* que tienen un recubrimiento aceptable. Para tener una visión global, se promediaron las dos medias de cada tipo de recubrimiento y se obtuvo que por cada lote de 250 *coils*, 246,55 cuentan con un recubrimiento aceptable.

Con estos valores, se puede entonces generalizar las características de la población total a partir de las muestras tomadas y obtener la probabilidad de que un *coil* cualquiera disponga de un recubrimiento que cumpla con los estándares de calidad. Esta probabilidad es de 98,62%.

Entre los requerimientos iniciales estaba aumentar este valor de 96,5% a al menos un 98%; claramente se cumplió con éste planteamiento, tal y como se muestra en la figura 6.3.

En cuanto al aspecto económico, en la tabla 6.5 se evidencia que hubo una disminución en las pérdidas mensuales por \$ 6837; al igual como se detalla en el gráfico de la figura 6.4. Considerando que la empresa INGPRO S.A, cobró la cantidad de \$ 7850³³ por la implementación del proyecto, se concluye que el periodo de recuperación de la inversión inicial, por parte de la empresa Boston Scientific, es de 1 mes y 3 días de producción normal de línea de extrusión; tal y como se muestra en la figura 6.5. Esto evidencia la factibilidad económica del proyecto.

³³ Departamento de ventas, INGPRO S.A.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- a. Se elaboró un documento con la caracterización de cada uno de los módulos que componen el sistema utilizado en el proceso de recubrimiento con polietileno de los *coils* que conforman los catéteres.
- b. No fue posible mejorar físicamente las ruedas de tracción de los ejes ni reemplazar el modo ducto por uno alternativo.
- c. El sistema de coordinación de los ejes de tracción se adaptó correctamente a la programación del controlador principal de la línea de extrusión; de forma tal que la velocidad lineal se mantuviera siempre constante.
- d. Se simuló un modo automático que, al cumplirse ciertas condiciones en la línea de extrusión, sobrescribe la velocidad de cada uno de los ejes de tracción.
- e. El tornillo sin fin de la extrusora es el que gobierna la velocidad de los tres ejes de tracción.
- f. El sistema es capaz de ajustar la velocidad de cada eje de tracción según el tipo de recubrimiento seleccionado desde las HMI.
- g. En el modo automático se puede cambiar la velocidad del eje de la extrusora, desde cualquiera de las dos HMI.
- h. Existe una probabilidad de 98,6 % de los *coils* tengan un recubrimiento que cumpla con los estándares de calidad en cuanto a diámetro del *coil* y homogeneidad del polietileno; cumpliendo con el requerimiento planteado inicialmente.
- i. El rendimiento de la línea de extrusión, evidenciado en la calidad del recubrimiento de los *coils*, aumentó en un 2,12%.

- j. La inversión para mejorar el sistema de arrastre se recupera en 1 mes y 3 días de operación normal de la línea de extrusión.

7.2 Recomendaciones

- a. Reemplazar el módulo ducto por un sistema con canal en acero inoxidable y tapa de acrílico con bisagras. Esto facilitará el mantenimiento y limpieza del módulo y evitará que el *coil* sea contaminado con impurezas antes de ser recubierto con el polietileno.
- b. Desbastar y vulcanizar las ruedas de tracción de los ejes 1, 2 y 4; con el fin de mejorar su agarre y dureza, aumentando la capacidad de arrastre del sistema de tracción.
- c. Implementar en cada una de las HMI una interface que permita seleccionar entre el nodo normal y el automático, para tener un control más directo de la operación de la línea de extrusión.

Bibliografía

- [1]. Bies, L. (2010). *RS485, specifications and in depth tutorial*. Recuperado el 10 de Setiembre de 2012, de <http://www.lammertbies.nl/comm/info/RS-485.html>
- [2]. Boston Scientific. (2012). *Boston Scientific Costa Rica*. Recuperado el Martes de Julio de 2012, de <http://www.bostonscientific.com/templatedata/imports/multimedia/AboutBSC/Careers/costa-rica-carreras.html>
- [3]. Boston Scientific Symbiosis. (2000). *1.0" Extruder Manual*. Boston Scientific.
- [4]. Chapman, S. J. (2000). *Máquinas eléctricas*. Colombia: Mc Graw Hill.
- [5]. Ingpro S.A. (2012). *Resumen Ejecutivo*. Heredia, Costa Rica.
- [6]. López, V. V. (2008). *Interface MPI*. Recuperado el 10 de Setiembre de 2012, de <http://homepage.cem.itesm.mx/vlopez/mpl.htm>
- [7]. Martínez, A. (Noviembre de 2007). *El PLC. Diagramas de Escalera*. Recuperado el 05 de Agosto de 2012, de <http://logica-digital.blogspot.com/2007/11/suplemento-8-el-plc-diagramas-de.html>
- [8]. Rashid, M. H. (1993). *Electrónica de Potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. México: Prentice Hall.
- [9]. Sapag Nassir, S. R. (2007). *Fundamentos de Preparación y Evaluación de Proyectos*. Mc Graw Hill.
- [10]. Sears, Z. Y. (2006). *Física Universitaria, Volumen 1*. USA: Pearson Educación.
- [11]. Siemens. (1998). *Simovert Masterdrivers Vector Control*. Recuperado el 10 de Agosto de 2012, de

http://www.zumbach.com/PDF/Prospects/English/ODAC/ODAC15XY_ODAC.07.0005.E.pdf

- [12]. Siemens. (1998-1999). *Micromaster Vector Catalogue*. Recuperado el 10 de Agosto de 2012, de <http://www.ectsales.com/home/180006094/180006094/MicroMaster%20SE92.pdf>
- [13]. Siemens. (2011). *Simatic S7-300: Technological functions*. Recuperado el 23 de Agosto de 2012, de http://www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/SINUMERIK_SINAMICS_04_2010_E/S7300TF.pdf?p=1
- [14]. Siemens AG. (2008). *Profibus: EL bus polivalente para la comunicación en la industria de procesos*. Recuperado el 21 de Agosto de 2012, de http://www.automation.siemens.com/w2/efiles/pes7/pdf/78/prdbrief/kb_profibus_es.pdf
- [15]. Siemens Simatic HMI. (1999). *OP7, OP17 Operator Panel: Equipment Manual*. Recuperado el 21 de Agosto de 2012, de http://cache.automation.siemens.com/dnl/zY/zYzNjk4MwAA_1145112_HB/Op717_e.pdf
- [16]. Simovert Masterdrives. (2000). *Short Guide to the Basics Functions*. Recuperado el 10 de Setiembre de 2012, de http://www.siemens.com.tr/i/Assets/Otomasyon/VC_Shortguide.pdf
- [17]. Zumbach Electronics. (2006). *ODAC 15XY-J, ODAD 15XY-JM*. Recuperado el 10 de Agosto de 2012, de http://www.zumbach.com/PDF/Prospects/English/ODAC/ODAC15XY_ODAC.07.0005.E.pdf

Apéndice

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

A: Amperios.

BSC: Boston Scientific Corp.

Coil: Espiral de forma tubular y flexible, hecho de acero inoxidable y recubierto con una capa de polietileno.

Encoder: Dispositivo transductor que convierte un tipo de variable física en una señal medible.

HMI: Interfaz Hombre Máquina (*Human Machine Interface*).

hp: Caballos de fuerza.

Hz: Hertz.

m/s: Metros por segundo.

m: Metros.

Máquina extrusora: Máquina que se alimenta de una tolva y hace pasar el material por un tornillo sin fin, que al estar caliente derrite el material que luego es expulsado por la máquina.

mm: Milímetros

MPI: Interface multipunto (*Multipoint Interface*)

n: Velocidad de rotación

OP: Panel de operador (*Operator Panel*)

PLC: Controlador lógico programable (*Programmable Logic Controller*)

Profibus DP: Bus de campo de procesos con periféricos descentralizados (*Process Field Bus Decentralized Peripherals*)

RPM: Revoluciones por minuto.

RS-485: Protocolo de comunicación serie que utiliza dos líneas. La representación de cada bit se realiza mediante diferencias de tensiones entre las líneas.

s: Segundo

Sensor inductivo: Clase especial de sensor que sirven para detectar materiales metálicos ferrosos.

V: Voltios

VAC: Voltios en Corriente Alterna

Variador de frecuencia: Sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

VDC: Voltios en Corriente Directa

VFD: Variador de frecuencia (Variable Frequency Drive).

V_L: Velocidad lineal