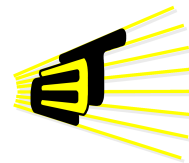


IDENTIFICACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE LAS FUNCIONES DE  
PROTECCIÓN DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE LA PLANTA DE  
POLIETILENO I DEL DEPARTAMENTO DE PETROQUÍMICA  
PERTENECIENTE A LA GERENCIA REFINERÍA  
BARRANCABERMEJA

DANIEL FELIPE DELGADO CASTELLANOS



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2018

IDENTIFICACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE LAS FUNCIONES DE  
PROTECCIÓN DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE LA PLANTA DE  
POLIETILENO I DEL DEPARTAMENTO DE PETROQUÍMICA  
PERTENECIENTE A LA GERENCIA REFINERÍA  
BARRANCABERMEJA

DANIEL FELIPE DELGADO CASTELLANOS

*Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de*  
Ingeniero Electrónico

Director  
Juan David Bastidas Rodríguez  
Ph.D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2018

---

## DEDICATORIA

---

*A mi mamá Maber y mi mamá Olinda, por apoyarme en todo momento, por creer en mí y por hacer tantos sacrificios para que nunca me falte nada, porque sin importar las circunstancias siempre están ahí para brindarme todo su amor.*

*A mi tía Marcela, a mis hermanas Diana y Mariana, a Sisoy y Eler, por acompañarme y hacer que nuestra familia siempre esté unida y llena de amor a pesar de la distancia.*

*A Luisa, por acompañarme en este proceso, por estar siempre a mi lado y hacer de mí mejor persona, porque alcanzamos este logro, siempre luchando juntos.*

---

## AGRADECIMIENTOS

---

*A ECOPETROL S.A por permitirme ser parte de su empresa y poder adquirir conocimientos y experiencias que aportaron en mi vida laboral y personal.  
Al Departamento de Petroquímica, en especial al ingeniero Jorge Bueno por darme su apoyo y guiarme durante mi estadía en la empresa.  
A la ingeniera Aileen Pusey por toda la ayuda brindada, por toda la paciencia y tiempo que me dedicó.*

*A mi director, el profesor Juan David Bastidas por colaborarme, orientarme y apoyarme durante el desarrollo de este proyecto.*

*A todos los profesores que durante toda mi carrera me aportaron todos sus conocimientos haciéndome crecer personal y profesionalmente.*

---

## CONTENIDO

---

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</b>	<b>15</b>
1.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO . . . . .	15
1.2. ALCANCE DEL PROYECTO . . . . .	16
1.3. OBJETIVOS . . . . .	16
1.3.1. Objetivo general. . . . .	16
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	17
<b>2 DESCRIPCIÓN DE ECOPETROL S.A.</b>	<b>18</b>
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL . . . . .	18
2.2. MISIÓN . . . . .	18
2.3. VISIÓN . . . . .	18
2.4. ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL . . . . .	19
<b>3 MARCO TEÓRICO</b>	<b>22</b>
3.1. SEGURIDAD FUNCIONAL . . . . .	22
3.2. CAPA DE PROTECCIÓN . . . . .	22
3.3. FUNCIÓN DE PROTECCIÓN . . . . .	25
3.3.1. Lógica de protección. . . . .	25
3.4. MATRIZ CAUSA EFECTO . . . . .	26
3.4.1. Causa. . . . .	27
3.4.2. Efecto. . . . .	28
3.4.3. Definiciones y notas. . . . .	29
3.5. PRUEBAS FUNCIONALES IPF . . . . .	31
3.5.1. Certificado de pruebas funcionales IPF. . . . .	31

---

<b>4 UNIDAD DE POLIETILENO [5]</b>	<b>34</b>
4.1. CARGAS Y PRODUCTOS . . . . .	34
4.1.1. Cargas. . . . .	34
4.1.2. Productos. . . . .	34
4.1.3. Sub-productos. . . . .	35
4.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO . . . . .	36
4.2.1. Recibo de cargas y compresión. . . . .	36
4.2.2. Reacción. . . . .	38
4.2.3. Separación y recicló . . . . .	39
4.2.4. Preparación de aditivos y extrusión. . . . .	40
4.2.5. Transferencia de producto. . . . .	43
<b>5 DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN [6]</b>	<b>44</b>
5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN . . .	44
5.1.1. Extrusor primario EX-2201. . . . .	44
5.1.2. Unidad de secado. . . . .	46
5.1.3. Clasificador de gránulos. . . . .	47
5.2. PLC ENCARGADO DEL CONTROL Y SEGURIDAD DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN . . . . .	47
5.3. LÓGICA DE PROGRAMACIÓN DEL PLC . . . . .	48
5.3.1. RSLOGIX 5000. . . . .	48
5.3.2. Contenido y extensión. . . . .	49
<b>6 CONSTRUCCIÓN DE ENTREGABLES</b>	<b>50</b>
6.1. DOCUMENTACIÓN DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA . . .	50
6.2. IDENTIFICACIÓN DE LAS FUNCIONES DE PROTECCIÓN Y PERMISI- VOS DEL SISTEMA . . . . .	57
6.2.1. Identificación de permisivos. . . . .	57
6.2.2. Identificación de las funciones de protección. . . . .	62
6.3. CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ CAUSA EFECTO . . . . .	63
6.4. DOCUMENTACIÓN DEL CERTIFICADO DE PRUEBAS FUNCIONALES IPF . . . . .	66

<b>7 CONCLUSIONES</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>70</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>71</b>

---

## LISTA DE FIGURAS

---

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Estructura general de ECOPETROL S.A. . . . .	19
Figura 2. Vicepresidencia de Refinación y Procesos Industriales. . . . .	20
Figura 3. Gerencia General Refinería Barrancabermeja. . . . .	21
Figura 4. Capas de protección. . . . .	23
Figura 5. Matriz Causa Efecto. . . . .	27
Figura 6. Matriz Causa Efecto - Causa. . . . .	28
Figura 7. Matriz Causa Efecto - Efecto. . . . .	29
Figura 8. Matriz Causa Efecto - Definiciones y Notas. . . . .	30
Figura 9. Certificado de pruebas funcionales IPF, página 1. . . . .	32
Figura 10. Certificado de pruebas funcionales IPF, página 2. . . . .	33
Figura 11. Diagrama general del proceso de fabricación de polietileno. . . . .	36
Figura 12. Diagrama del proceso de extrusión de polietileno. . . . .	41
Figura 13. Variables de entrada digital en la programación del PLC. . . . .	51
Figura 14. Variables de salida digital en la programación del PLC. . . . .	52
Figura 15. Variables de entrada analógica en la programación del PLC. . . . .	53
Figura 16. Plano de conexiones de las entradas digitales con el módulo . . . . .	55
Figura 17. Plano de conexiones de las entradas analógicas con el módulo . . . . .	56
Figura 18. Programación del PLC del sistema de extrusión . . . . .	58
Figura 19. Activación de la variable Cutter_Knives.XL_IN_Selected. . . . .	60
Figura 20. Variable Pellet_H2O_Valve.XL_To_Cutter. . . . .	61
Figura 21. Valor máximo de Extruder_Drive.II. . . . .	62
Figura 22. Construcción de la MCE. . . . .	65
Figura 23. Construcción del certificado de pruebas IPF, parte 1. . . . .	67
Figura 24. Construcción del certificado de pruebas IPF, parte 2. . . . .	68

---

## LISTA DE ANEXOS

---

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Entradas y salidas del sistema de extrusión. . . . .	71
Anexo B. Matriz Causa Efecto. . . . .	71
Anexo C. Certificado de pruebas funcionales IPF. . . . .	71

---

## RESUMEN

---

- TÍTULO:** Identificación y documentación de las funciones de protección del sistema de extrusión de la planta de Polietileno I del Departamento de Petroquímica perteneciente a la Gerencia Refinería Barrancabermeja \*
- AUTOR:** Daniel Felipe Delgado Castellanos \*\*
- PALABRAS CLAVE:** Análisis de riesgos, análisis operacional, función de protección, lenguaje de programación, PLC, seguridad funcional, sistema de extrusión.

### DESCRIPCIÓN:

El proyecto consiste en la identificación y documentación de las funciones de protección del sistema de extrusión de la planta de Polietileno 1 del departamento de petroquímica de la refinería de Barrancabermeja, partiendo de un estudio del proceso general de la fabricación de polietileno y del sistema de extrusión para poder lograr una mejor interpretación de la programación del PLC que protege y controla este sistema. Esta programación se estudia con el fin de identificar los permisivos del sistema y las funciones de protección para poder construir la Matriz Causa Efecto (MCE) y el Certificado de Pruebas Funcionales IPF.

La MCE es un documento que contribuye con el análisis operacional del sistema de extrusión pues condensa la información de los permisivos y funciones de protección de tal manera que los operadores e ingenieros del área operativa tengan a la mano todos los recursos necesarios para garantizar un buen funcionamiento del sistema.

El certificado de pruebas funcionales IPF contribuye a la seguridad funcional del sistema ya que con su ayuda se asegura un buen funcionamiento de las funciones de protección, teniendo en cuenta la instrumentación y conexiones físicas a los módulos de entradas y salidas del PLC, en este documento se detalla la información de todas las funciones de protección, así como la manera de verificar su correcto funcionamiento.

---

\*Trabajo de investigación

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Juan David Bastidas Rodríguez, Ph.D

---

## ABSTRACT

---

**TITLE:** Identification and documentation of the protection functions of the extrusion system of the Polyethylene I plant of the Department of Petrochemicals belonging to the Barrancabermeja Refinery Management \*

**AUTHOR:** Daniel Felipe Delgado Castellanos \*\*

**KEYWORDS:** Extrusion system, functional safety, risk analysis, operational analysis, PLC, programming language, protection function.

### DESCRIPTION:

The project consists in the identification and documentation of the protection functions of the extrusion system of the Polyethylene 1 plant of the petrochemical department of the Barrancabermeja refinery, beginning in a study of the general process of polyethylene manufacture and the extrusion system in order to achieve a better interpretation of the PLC programming that protects and controls this system. This programming is studied in order to identify the permissive of the system and the protection functions to be able to build the Matrix Cause Effect (MCE) and the Functional Tests Certificate IPF. The MCE is a document that contributes with the operational analysis of the extrusion system because it condenses the information of the permissive and protective functions in such a way that the operators and engineers of the operative area have at hand all the necessary resources to guarantee a good functioning of the system. The functional test certificate IPF contributes to the functional safety of the system since with its help it ensures a good functioning of the protection functions, considering the instrumentation and physical connections to the input and output modules of the PLC, in this document the information of all the protection functions is detailed, as well as the way to verify its correct operation.

---

\*Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Juan David Bastidas Rodríguez, Ph.D,

---

## INTRODUCCIÓN

---

ECOPETROL S.A busca que la calidad de sus productos ofrecidos sea la mejor, para así seguir siendo una de las mejores empresas del país y convertirse en una de las mejores del mundo. Por esta razón siempre vela, entre otras cosas, por la calidad y buen funcionamiento de sus equipos.

En el departamento de petroquímica se produce polietileno de baja densidad. Esta producción cuenta con un proceso de extrusión, el cual es fundamental para garantizar la calidad del producto. Dicho proceso es realizado por el extrusor, el cual transforma el polietileno fundido en el producto final conocido como gránulo o “pellet” de polietileno. Conocer el funcionamiento de este equipo es de vital importancia, pues garantiza la correcta operación que ayuda a cumplir con los estándares de calidad que maneja ECOPETROL S.A. El funcionamiento no se limita a la parte mecánica y/o eléctrica, sino también a toda la electrónica que ayuda a controlar el proceso mediante un PLC. Por esta razón, es de vital importancia conocer a fondo toda la instrumentación y programación asociada, ya que un buen control garantiza que se cumplan los estándares de calidad.

Este proyecto busca documentar toda la programación que está asociada al PLC que controla la unidad de extrusión. En la primera parte se realiza la vinculación de las variables físicas medidas por la instrumentación, con las variables de programación del PLC. En la segunda parte se hace una descripción de los bloques fundamentales que conforman la programación en lenguaje ladder, para finalmente realizar los diagramas de flujo de dicha programación.

---

# 1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

---

## 1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La unidad de Polietileno I del departamento de petroquímica de la refinería de Barrancabermeja, tiene como objetivo principal garantizar la disponibilidad de polietileno y así contribuir a que se cumplan los objetivos de la Gerencia Refinería Barrancabermeja, para satisfacer la demanda nacional del producto en términos de calidad y oportunidad. Por esta razón, es necesario tener rutinas operacionales que prevengan paradas no deseadas de la unidad. Dentro de los sistemas de la planta, se encuentra la extrusión, que es un proceso crítico para la producción de polietileno ya que se encarga de dar la forma final de granulo o “pellet” al polietileno. Este sistema produce aproximadamente 2.500 kg de polietileno por hora y es la etapa final del proceso de producción de polietileno; por lo tanto, es necesario que siempre esté operando de la mejor manera, ya que, si se llega a producir una parada muy prolongada del sistema, la producción de polietileno es detenida, generando grandes pérdidas para la refinería.

En el 2008 fue modernizado este sistema y la empresa contratada para tal fin no entregó la documentación correspondiente, por lo que no se contaba con manuales, instructivos, causas y efectos de parados no deseadas, entre otros. Como consecuencia, el sistema de extrusión no cuenta con las rutinas claramente documentadas, lo que ha generado brechas de conocimiento en los operadores y en el manejo del sistema. Dichas brechas han ocasionado algunos incidentes que desembocan en paradas no deseadas, impidiendo que se cumplan las metas de la unidad, en cuanto a disponibilidad y productividad. Por ejemplo, cuando se produce una parada no deseada en el proceso, el operador no conoce con exactitud la causa, por tal motivo el tiempo de duración de dicha parada es prolongado, pues se dificulta encontrar el motivo que ocasionó la interrupción. Adicionalmente, estas rutinas permiten la seguridad operacional [4], pues certifica que las funciones de protección estén disponibles cuando sean necesarias.

Teniendo en cuenta lo anterior, y con el propósito de hacer un aporte significativo a la seguridad de los procesos [4], la disponibilidad mecánica de la unidad y que

se cumplan las metas de producción en la misma, se realiza el presente trabajo, cuya consecuencia general es, garantizar la disponibilidad operacional del sistema de extrusión de la planta de Polietileno I, a través de la identificación y documentación de rutinas operacionales que prevengan paradas no deseadas de la unidad, asegurando que el operador cuente con la información de primera mano, como los lazos de las funciones de protección y la matriz de causas y efectos.

## **1.2 ALCANCE DEL PROYECTO**

Va desde la revisión de la información operacional disponible, para documentar la lógica programada en el PLC Allen Bradley, que se utiliza para el control y protección del proceso de extrusión [3]; así como, la construcción de los documentos de apoyo que facilitan el análisis operacional, tales como la matriz de causas y efectos, y el protocolo para las pruebas funcionales IPF.

En el análisis operacional, entre otros, se analizan todos los riesgos que pueda generar el sistema y como parte del resultado se genera la matriz causa efecto, documento que tienen a la mano operadores e ingenieros de campo para que puedan dar una respuesta oportuna ante una posible eventualidad. Igualmente, se genera el documento de pruebas funcionales IPF, que bajo los estándares de calidad de la empresa, debe contener documentadas todas las funciones de protección del sistema para realizar las respectivas pruebas instrumentadas de seguridad.

En términos generales, el sistema de extrusión recibe el polietileno fundido y entrega el polietileno sólido en forma de gránulo o "pellet". Para realizar esto la lógica, del PLC cuenta con 255 páginas de programación, dentro de las cuales es necesario identificar las señales que corresponden a la protección del sistema.

## **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo general.** Identificar, interpretar y documentar las rutinas de protección del sistema de extrusión, programadas en un PLC Allan Brandley, siguiendo las metodologías utilizadas en la empresa.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Conocer el funcionamiento del sistema de extrusión dentro de la operación de la planta de Polietileno I.
- Identificar las rutinas de protección programadas en el PLC que hacen parte del sistema de extrusión, documentando el protocolo de seguridad funcional.
- Construir la matriz causa efecto que facilite el análisis operacional e interpretación de los riesgos del sistema de extrusión.

---

## **2. DESCRIPCIÓN DE ECOPETROL S.A.**

---

### **2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL**

Ecopetrol es una sociedad de economía mixta, de carácter comercial, organizada bajo la forma de sociedad anónima, del orden nacional, vinculada al ministerio de Minas y Energía. Es la empresa más grande de Colombia y es una compañía integrada del sector de petróleo y gas, que participa en todos los eslabones de la cadena de hidrocarburos: exploración, producción, refinación y comercialización.

Con 66 años de historia, sus campos de extracción se encuentran ubicados en el centro, sur, oriente y norte de Colombia; cuenta con dos refinerías (Barrancabermeja y Cartagena) y tres puertos para exportación e importación de combustibles y crudos en ambas costas (Coveñas y Cartagena, en el Mar Caribe, y Tumaco, en el Océano Pacífico). También es dueña de la mayor parte de los oleoductos y poliductos del país que intercomunican los sistemas de producción con los grandes centros de consumo y los terminales marítimos.

Tiene participación en el negocio de los biocombustibles y tiene presencia en Brasil, Perú y el Golfo de México (Estados Unidos).

### **2.2 MISIÓN**

“En ECOPETROL S.A trabajamos todos los días para construir un mejor futuro, un futuro rentable y sostenible, con una operación sana, limpia y segura asegurando la excelencia operacional y la transparencia en cada una de nuestras acciones y construyendo relaciones de mutuo beneficio con los grupos de interés.” [7].

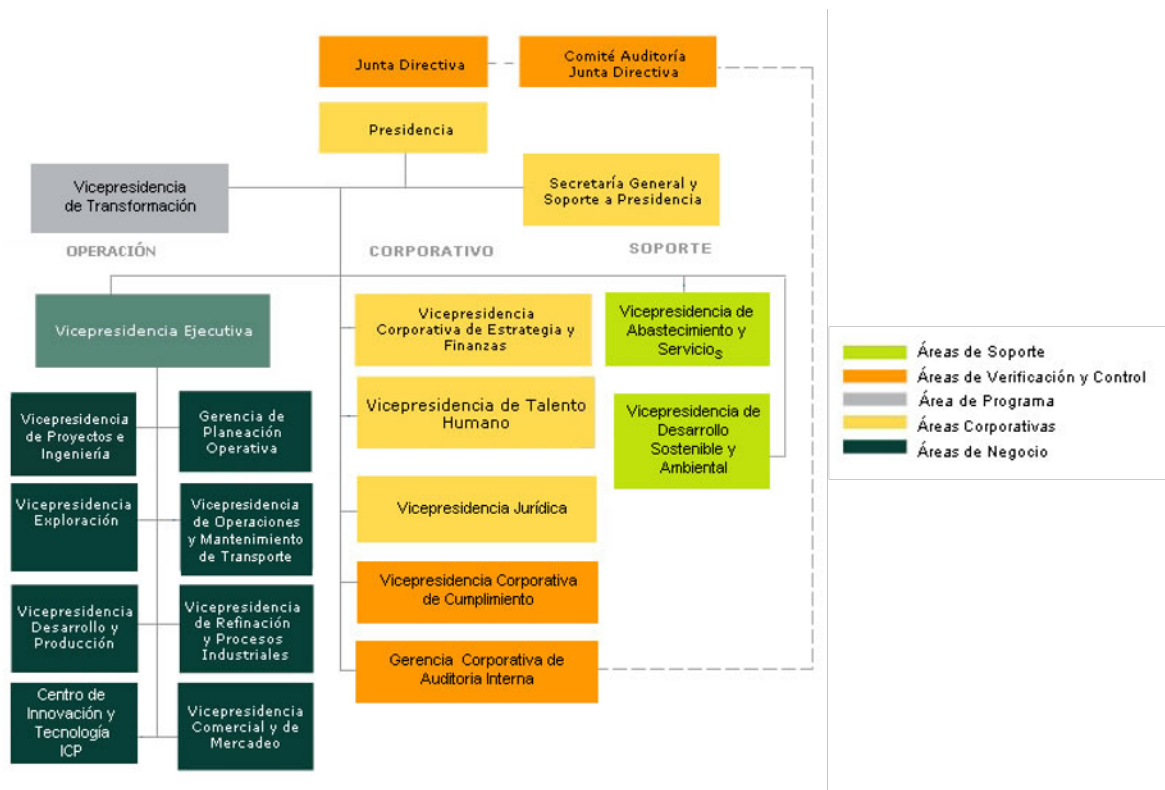
### **2.3 VISIÓN**

“ECOPETROL será una compañía integrada de clase mundial de petróleo y gas, orientada a la generación de valor y sostenibilidad, con foco en Exploración y Producción, comprometida con su entorno y soportada en su talento humano y la excelencia operacional.” [7].

## 2.4 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

En la figura 1 se puede observar la estructura general de ECOPETROL S.A la cual está distribuida en cinco grandes áreas: de soporte, de verificación y control, de programa, corporativas y de negocio.

**Figura 1:** Estructura general de ECOPETROL S.A..

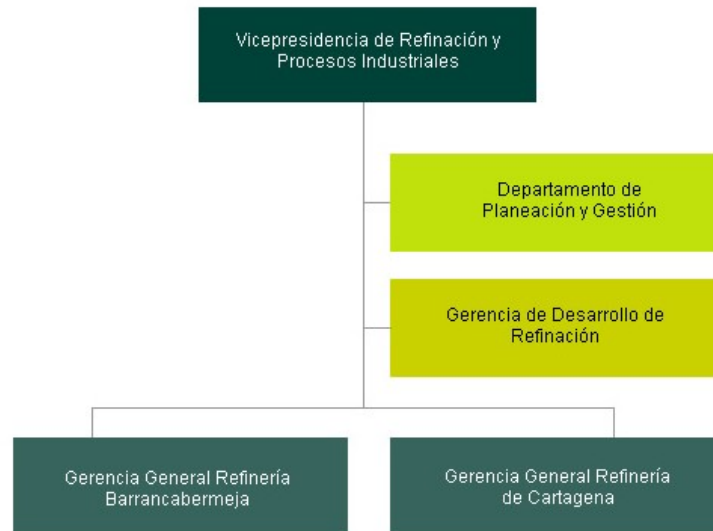


Fuente: ECOPETROL S.A. Estructura Organizacional. [En línea]. Recuperado en 22 de noviembre de 2017. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/acerca-de-ecopetrol/estructura-organizacional/organigrama>

Dentro de la vicepresidencia ejecutiva se encuentra la vicepresidencia de refinación y procesos industriales la cual está compuesta por tres gerencias y un departamento, como se puede observar en la figura 2, esta vicepresidencia corresponde a la

refinación, petroquímica y cualquier otro proceso industrial de los hidrocarburos y sus derivados, para producir derivados, petroquímicos y otros productos requeridos por el mercado, en forma rentable.

**Figura 2:** Vicepresidencia de Refinación y Procesos Industriales.



Fuente: ECOPETROL S.A. Estructura Organizacional. [En línea]. Recuperado en 22 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://iris/contenido/contenido.aspx?catID=278&conID=48123&pagID=178939>

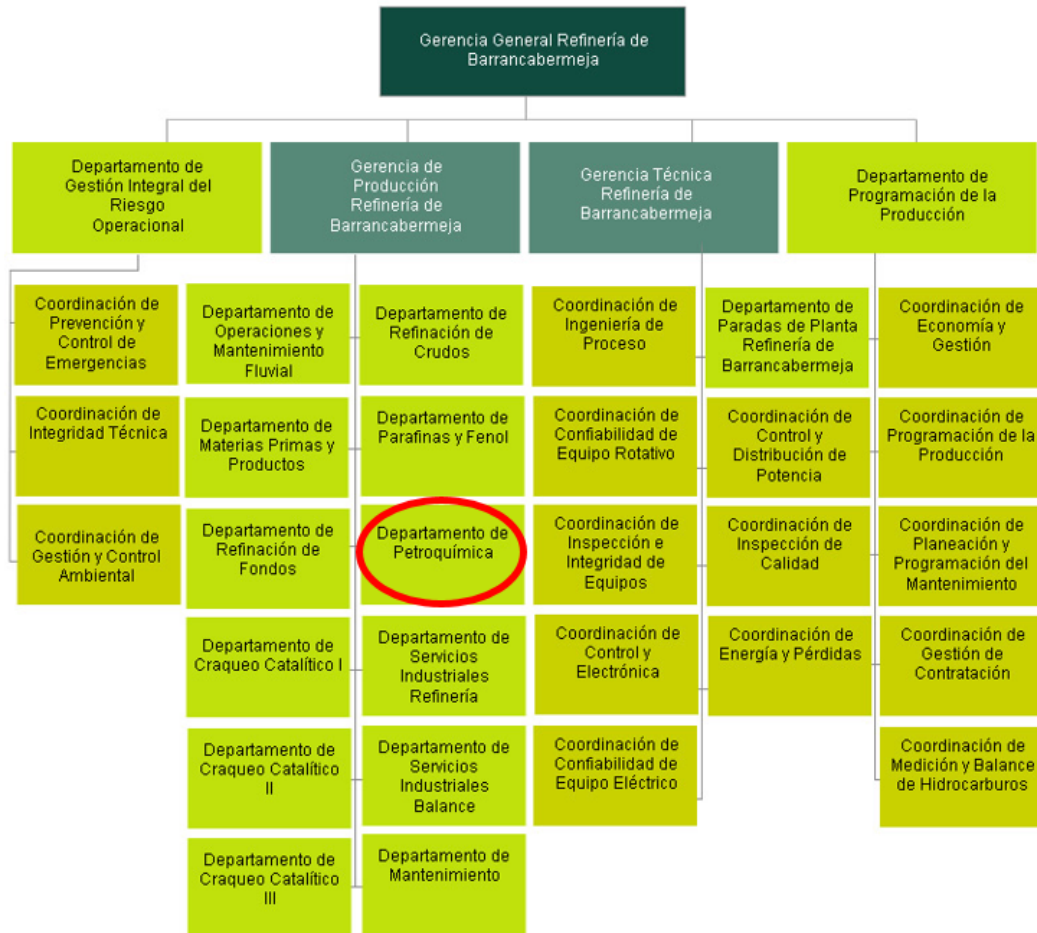
La Gerencia General Refinería Barrancabermeja tiene la responsabilidad de generar el 75 % de la gasolina, combustóleo, ACPM y demás combustibles que el país requiere, así como el 70 % de los productos petroquímicos que circulan en el mercado nacional.

Cuenta, entre otras, con las siguientes unidades: cinco de topping, cuatro de ruptura catalítica, dos de polietileno y plantas de alquilación, ácido sulfúrico, parafinas, aromáticos y plantas para el procesamiento de residuos.

El departamento de petroquímica, ubicado dentro de la Gerencia General Refinería Barrancabermeja, figura 3, está formado por dos plantas de polietileno y una de

aromáticos, este departamento entrega productos como polietileno, producido en las dos plantas del mismo nombre, benceno, tolueno, orto xileno, entre otros, producidos en la planta de aromáticos.

**Figura 3:** Vicepresidencia Gerencia General Refinería Barrancabermeja.



Fuente: ECOPETROL S.A. Estructura Organizacional. [En línea]. Recuperado en 22 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://iris/contenido/contenido.aspx?catID=278&conID=48123&pagID=179970>

---

## 3. MARCO TEÓRICO

---

### 3.1 SEGURIDAD FUNCIONAL

Los estudios demuestran que las organizaciones con conductas de riesgo contribuyen del 86 % al 96 % de las lesiones e incidentes [9]. Si estas empresas no tienen una mejora continua tanto en procesos como en seguridad, todos los sistemas y procesos terminarán siendo obsoletos, elevando el nivel de riesgo y por consecuencia generando un incidente que podría ser fatal. Debido a esto nace la idea de seguridad funcional, que busca la continua mejora para asegurar que el nivel de riesgo siempre permanezca en su mínimo valor, que desafortunadamente nunca será 0, ya que siempre existirá la incertidumbre de que suceda algún hecho aleatorio.

Según la norma IEC61508, seguridad funcional se define como: “Parte de la seguridad general de los equipos bajo control (EUC) y del sistema de control del EUC que depende del funcionamiento correcto de los sistemas eléctricos, electrónicos y electrónicos programables relacionados con la seguridad, así como de los sistemas relacionados con la seguridad basados en otras tecnologías y dispositivos externos utilizados para la reducción de riesgos” [3].

Una definición más práctica, es la detallada en el libro Seguridad Funcional, Incluyendo Ciberseguridad y Administración de Alarmas: “La seguridad funcional se define como el proceso general sistematizado que se apoya en la tecnología de equipos de seguridad automatizados para mantener al proceso libre de riesgos inaceptables” [4]. Teniendo clara esta idea, es aquí donde entran en juego las capas de protección, ya que estas capas son las encargadas de garantizar la seguridad funcional.

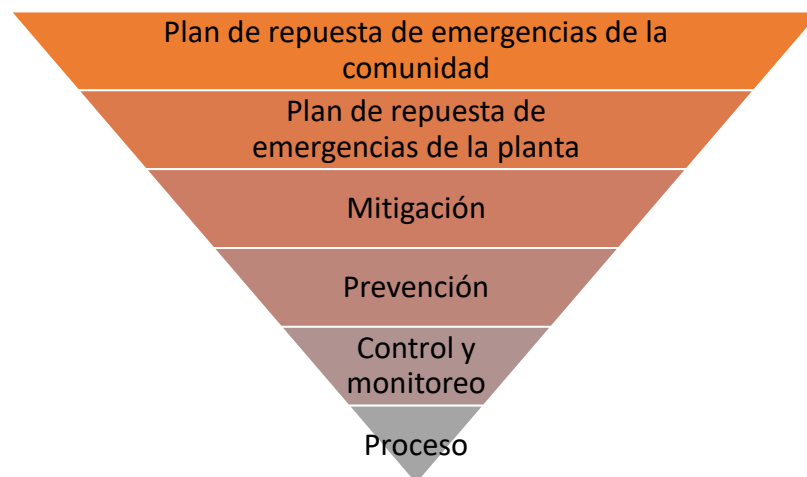
### 3.2 CAPA DE PROTECCIÓN

En la industria se pueden generar grandes impactos debido a las sustancias y procesos que pueden llegar a ser peligrosos, toda empresa busca minimizarlos y asegurar así la integridad de sus trabajadores, instalaciones y comunidad en general. Debido a esto es necesario implementar estrictos criterios de seguridad que ayuden a mitigar cualquier tipo de evento que pueda llegar a ocasionar algún incidente. Las capas de protección (figura 4) son una secuencia de controles de proceso que ayu-

dan a evitar y extinguir estos posibles riesgos de los sistemas donde la seguridad es primordial. Se recomienda que las empresas que sean susceptibles a los riesgos se acojan a estrictos criterios. Para ello existen diferentes guías o normas como la IEC61511 o ISA 84, de las cuales las compañías se pueden basar para asegurar sus procesos. Estas normas son un estándar técnico que establecen prácticas en la ingeniería de sistemas que garantizan la seguridad de un proceso industrial mediante el uso de instrumentación [3].

En la figura 4 se pueden observar las seis capas de protección expuestas en la IEC61511.

**Figura 4:** Capas de protección.



Fuente: Adaptado de: Norma IEC61511 [2].

La idea de estas capas consiste en que cada una de ellas respaldar a la anterior, de tal manera que si alguna llega a fallar, la siguiente realizará el control, consiguiendo que el proceso continúe en un estado seguro.

Las capas no se limitan estrictamente a las mostradas en la figura 4, ya que cada proceso es diferente y requiere diferentes tipos y niveles de protección. Es ahí donde las empresas deben realizar sus respectivos análisis para determinar la cantidad

necesarias de capas. De esta manera, a medida que aumente el número de capas aumentará la seguridad.

Según la norma ISA 84, cada una de las capas debe cumplir ciertas características, estas son:

- **Independencia:** Cada capa de protección debe ser independiente entre el control básico del proceso y cada capa de protección. Este principio fundamental busca evitar fallas de causa común, teniendo con esto una reducción de riesgo por cada capa dependiendo del grado de efectividad.
- **Efectividad:** Las capas de protección deben tener una confiabilidad “expedita”, esto es, debe ser lo suficientemente confiable teniendo una probabilidad de falla muy baja, ya que, de lo contrario, no contribuirá significativamente en la reducción del riesgo, por lo tanto, no tiene caso mantener una capa de protección de baja efectividad.
- **Especificidad:** Una capa de protección debe ser exclusiva para un riesgo en particular, por lo tanto, debe definirse claramente el evento peligroso a evitar para poder definir la barrera dedicada que puede combatirlo.
- **Auditabilidad:** Se debe demostrar que cada capa ha sido diseñada, mantenida y operada para el combate de un riesgo en particular y conserva los principios de evaluación que la hacen ser una capa de protección.

Una vez se tengan claras las características que deben cumplir, las capas de protección se conforman así:

- **Proceso:** Es la primera de las capas, como su nombre lo indica, el proceso en sí debe estar diseñado de tal manera que sea seguro.
- **Control y monitoreo:** Está compuesto del sistema de control básico del proceso, sistema de monitoreo (alarmas de proceso) y la supervisión del operador.
- **Prevención:** Como su nombre lo indica, está destinada a prevenir posibles accidentes. Esta capa puede estar dividida en dos o más capas y se conforman por: sistemas de protecciones mecánicas, alarmas de proceso con acción correctiva del operador, sistema de control instrumentado de seguridad y sistema de prevención instrumentado de seguridad.

- **Mitigación:** Se instala con el objetivo de mitigar las consecuencias derivadas de los accidentes que se generan. Al igual que la capa de prevención, esta se puede dividir en más capas y están conformadas por: sistemas mecánicos de mitigación (sistema de relevo de presión), sistema de control instrumentado de seguridad, sistema de mitigación instrumentado de seguridad y la supervisión del operador.
- **Plan de emergencias de la planta y comunidad:** Se trata de una de las últimas capas en la que se activan los mecanismos del plan de contingencia como brigadas o la intervención de entidades como bomberos. Busca extinguir los efectos del accidente en la planta donde ocurrió y prevenir que afecten a la comunidad en general.

### 3.3 FUNCIÓN DE PROTECCIÓN

Una vez definidas cada una de las capas, entran en juego las funciones de protección, las cuales son propias de cada capa, estas funciones son la parte de la seguridad general que depende de un correcto funcionamiento de un sistema o equipo en respuesta a sus entradas.

Una función de protección es la detección de una condición potencialmente peligrosa que resulta en la activación de un dispositivo o mecanismo de protección o corrección para evitar que ocurran eventos peligrosos o proporcionar mitigación para reducir las consecuencias del evento peligroso [3].

Un claro ejemplo de una función de protección es la respuesta del sistema contra incendios cuando un sensor detecta humo, al ser detectado la lógica de protección entra en juego y mitiga la condición activando las válvulas de diluvio que permiten el flujo de agua.

**3.3.1 Lógica de protección.** Todos los procesos que se encuentran automatizados por un PLC, a demás de ser controlados, son protegidos. Cada PLC cuenta con lógicas de protección programadas que permiten velar por la seguridad funcional del proceso aplicando las funciones de protección definidas en las primeras 3 capas de protección mencionadas en la sección 3.2.

La lógica de protección es la encargada de hacer que la función de protección sea aplicada, por lo tanto, no interfiere en el proceso normal que se lleva a cabo, sólo interviene cuando se detecta alguna condición potencialmente peligrosa, dando como respuesta, por ejemplo, la activación de algún elemento final de control o el corte de la energía eléctrica para que el sistema sea detenido. Esto último puede resultar en paradas no deseadas del proceso, pero evita que un incidente mayor pueda ocurrir.

### **3.4 MATRIZ CAUSA EFECTO**

La matriz causa efecto (MCE), figura 5, es un documento que maneja ECOPETROL S.A. para facilitar la interpretación del funcionamiento de los sistemas más complejos con los que cuenta. En esta matriz se condensa la información de las funciones de protección y permisivos del sistema, estos últimos son las condiciones que se deben cumplir para que se pueda ejecutar una acción, como por ejemplo el arranque de un motor.

Las diferentes entradas que puede tener el sistema son relacionadas con los efectos en las salidas mediante convenciones. Estas son letras que representan cierta acción, por ejemplo una “S” puede representar una “parada del equipo”. De esta manera, si una entrada se relaciona con una salida mediante la letra “S”, significa que cierta condición de esa entrada ocasiona la parada del equipo relacionado. Así es posible conocer qué repercusiones tiene el cambio de una variable física, medida por un sensor, a la entrada sistema, con las acciones tomadas por los elementos finales de cada sistema, como motores, válvulas, etc. En la figura 5 se puede observar que cuando ocurre un cambio en el valor de la variable medida por el sensor que lleva por TAG XS22022A, el motor principal con TAG MEX2201 es parado. En las secciones siguientes se explica de mejor manera cada una de las partes de la matriz, siendo las principales: Causa, Efecto y Definiciones y Notas.



**Figura 6:** Matriz Causa Efecto - Causa.

TAG No.	SERVICIO	TIPO
XS22022A	Cambio de la señal de estado del motor	

Fuente: ECOPETROL S.A.

En la figura 6 se observa la información principal que debe contener, esta es:

- **TAG No.:** Es la identificación del sensor o instrumento, se rige por la norma ISA 5.1, cada TAG es único e irrepetible.
- **Servicio:** Indica la condición que se debe cumplir para que ocurra un efecto a la salida. Esto con el fin de facilitar la interpretación, ya que es muy difícil conocer la totalidad de los TAG en sistemas complejos y con gran cantidad de instrumentación.
- **Tipo:** Indica qué tipo de condición es, solo aplica para variables analógicas, se representa mediante las letras L y H que significan “Low” y “High”, esto implica que si la variable presenta un valor por debajo o encima de su umbral, se produce la consecuencia relacionada.

**3.4.2 Efecto.** Aquí se establecen los efectos que ocurren por las condiciones establecidas en las causas.

**Figura 7:** Matriz Causa Efecto - Efecto.

<b>TAG No.</b>	<b>SERVICIO</b>
<b>MEX2201</b>	Motor principal

Fuente: ECOPELROL S.A.

En la figura 7 se evidencia la información principal que debe contener, así:

- **TAG No.:** Al igual que en la Causa, es la identificación del instrumento o equipo afectado.
- **Servicio:** Hace referencia al equipo que sufrirá consecuencias, esto, al igual que en el servicio de la Causa, facilita la interpretación.

**3.4.3 Definiciones y notas.** En esta sección del documento se consignan las diferentes convenciones que relacionan las entradas con las salidas, como se mencionó anteriormente, por ejemplo una “S” significa “para del equipo”.

**Figura 8:** Matriz Causa Efecto - Definiciones y Notas.

DEFINICIONES	
<b>S</b>	Paro de equipo
NOTAS	

Fuente: ECOPETROL S.A.

En la figura 8 se puede observar la manera como se hace la descripción. Las principales convenciones que se usan son:

- A: Arranque del equipo.
- C: Cierre de válvula.
- D: Desenergizar solenoiode.
- E: Energizar solenoide.
- O: Aperturta de válvula.
- P: Permiso.
- S: Paro de equipo.
- T: Temporizador.
- X: Paro de unidad.

Si se tiene alguna aclaración o comentario, se debe consignar en la sección de notas, allí, por ejemplo, pueden ir los valores “Low” o “High” de las variables analógicas en los cuales sucede la condición que repercute a la salida.

### 3.5 PRUEBAS FUNCIONALES IPF

Una función instrumentada de protección (IPF) es una función de protección diseñada para lograr un estado seguro para un evento peligroso específico. Una IPF está formada por sensores, lógicas de protección y elementos finales. Las fallas de una IPF pueden causar graves consecuencias en las personas, el medio ambiente, los activos y la reputación, si no existe una capa de protección que lo evite [8].

ECOPETROL S.A. dentro de sus políticas de seguridad cuenta con las pruebas funcionales IPF, que, como su nombre lo indica, son pruebas que se realizan durante las paradas programadas de las unidades de producción para verificar que todas las funciones de protección o IPFs de los sistemas estén operando correctamente y se encuentren disponibles en caso de que se requieran para preservar así la seguridad funcional.

Es necesario realizar estas pruebas ya que como se mencionó en la sección 3.3.1, las funciones de protección no intervienen en el proceso normal que se lleva a cabo, por lo tanto toda la instrumentación asociada a la seguridad está en estado de espera para actuar ante cualquier evento potencialmente peligroso. Por este motivo, solo se puede saber si los mecanismos funcionan correctamente cuando exista un riesgo, si no se tiene la certeza que funcionan adecuadamente, podría ocurrir un desastre de grandes magnitudes.

Para realizar las pruebas funcionales IPF se requiere el Certificado de pruebas funcionales IPF, documento que se describe a continuación.


**3.5.1 Certificado de pruebas funcionales IPF.** Es un documento que se usa como apoyo para realizar las pruebas funcionales IPF, este documento cuenta con la información necesaria para realizar la prueba a la instrumentación asociada a las funciones de protección de un sistema. Como su nombre lo indica, certifica que las IPF funcionen correctamente.

Este certificado cuenta con dos grandes partes: La descripción de los *interlocks* y la verificación.

- **Descripción de los interlock:** Un interlock es la acción final que ejecuta una

función de protección para llevar a un estado seguro cualquier evento potencialmente peligroso, en la primera parte del certificado, figura 9, se realiza la descripción detallada de los interlock.

**Figura 9:** Certificado de pruebas funcionales IPF, página 1.

 DESCRIPCIÓN DE INTERLOCK'S EX2201 PPQ-PTB-IPF-			
No. DE INTERLOCK	DESCRIPCIÓN	DIAGRAMA DE REFERENCIA	NOTAS

Fuente: ECOPETROL S.A.

- **No. de Interlock:** Aquí se enumera y nombra el interlock a describir, la numeración se realiza en orden ascendente y a todos los números los precede una letra I, por ejemplo I01, I02, I03, etc.
- **Descripción:** Aquí se describen detalladamente las acciones que tienen como consecuencia la ejecución del interlock.
- **Verificación de los interlock:** Una vez se conozcan todos los interlock se procede a realizar la certificación de su correspondiente funcionamiento, en la figura 10 se puede observar la estructura usada para esto.

Figura 10: Certificado de pruebas funcionales IPF, página 2.

CERTIFICADO GENERAL DE PRUEBAS FUNCIONALES								
ecopETROL		INTERLOCK'S EX2201			FECHA : _____			
PPQ-PTB-IPF-								
INTERLOCK	CONDICIONES INICIALES	✓	CAUSA	✓	EFEECTO	✓	VERIFICACIONES	✓
	Forzar como normal la instrumentación asociada a los siguientes cortes:							

Fuente: ECOPETROL S.A.

- **Interlock:** Aquí, como en la parte anterior, se realiza la numeración de los interlock.
- **Condiciones iniciales:** Como se mencionó anteriormente, las pruebas funcionales IPF se realizan cuando la unidad se encuentra en una parada programada, por lo tanto es necesario simular que se está realizando el proceso normal y así comprobar que la IPF actúa de manera adecuada. Es esta sección se describe la manera de cómo la instrumentación o señales del sistema deben ser forzadas para simular el proceso.
- **Causa:** Describe el motivo por el cual el interlock fue activado.
- **Efecto:** Son las consecuencias que ocurren por la ejecución del interlock, si la IPF está funcionando adecuadamente, todos los efectos se deberían llevar a cabo correctamente.
- **Verificaciones:** Es la manera como se puede verificar que el interlock se ejecutó apropiadamente, normalmente hacen parte las alarmas audiovisuales.

---

## 4. UNIDAD DE POLIETILENO [5]

---

La unidad de polietileno tiene como objetivo producir polietileno de baja densidad, es uno de los plásticos más comunes debido a su bajo precio y facilidad de fabricación. A continuación se describe la unidad, presentando las diferentes variedades de polietileno y el proceso que lleva a cabo su fabricación.

### 4.1 CARGAS Y PRODUCTOS

**4.1.1 Cargas.** La Unidad Polietileno I recibe como carga típica 6518 lb/h de etileno proveniente de la Planta de Etileno II (U-4100) de la refinería. Con el fin de llevar a cabo la reacción de polimerización actualmente la unidad emplea compuestos iniciadores que se inyectan justo antes de que el etileno gaseoso entre al reactor.

Otros compuestos que se inyectan a la unidad son los aditivos encargados de impartir al polietileno propiedades específicas como las antiadherente, deslizante en algunos tipos de resinas y antioxidante en otro tipo de resinas. Como diluyente de los aditivos se emplea aceite mineral. La carga actual depende de la resina en producción.

**4.1.2 Productos.** La carga a la Unidad Polietileno I se procesa para obtener como producto polietileno de baja densidad. Dependiendo de los aditivos empleados durante la extrusión y de ajustes operacionales de presión y temperatura, se pueden obtener diferentes productos comerciales:

- **Resina Polifén 640:** Es una resina para extrusión de película y para procesos de soplado e inyección - soplado. Se utiliza para fabricación de bolsas de mediana resistencia, envases para medicinas líquidas y películas para uso en agricultura y construcción. Tiene una excelente resistencia a la ruptura.
- **Resina Polifén 641:** Es la referencia de mayor producción, alrededor del 95 % del total. La resina 641 sirve para extrusión de películas de múltiple uso. Está diseñada para ser utilizada en donde se requieran buenas propiedades mecánicas y ópticas. Se emplea para bolsas de supermercados, panadería, alimentos, forros de cuadernos y otros usos. También se utiliza para fabricar bolsas semi

industriales y empaques de alimentos en procesos de sellado automático solo o en conjunto con resinas de última tecnología, dependiendo del nivel de exigencia de las empacadoras.

- **Resina Polifén 656:** La producción depende de la solicitud del cliente. Es una resina de alta claridad para extrusión de películas y está diseñada para usos donde se necesita alta transparencia, alto brillo o película delgada. Posee excelente estiramiento, buena sellabilidad y propiedades ópticas. Se emplea para fabricar fundas o bolsas para confecciones, empaques de alimentos y en general para artículos que requieren excelente presentación.
- **Resina Polifén 683:** La producción depende de la solicitud del cliente. Es una resina apropiada para fabricar película de alta resistencia para manufactura de empaques para sólidos y líquidos. Otros usos en los que se aprovecha la fortaleza del material son sacos para uso pesado, empaque de alimentos congelados, películas termoencogibles y cubiertas para invernadero.
- **Resina Polifén 683A:** La producción depende de una solicitud especial del cliente. Es una resina apropiada para fabricar película de alta resistencia para manufactura de piezas mecánicas de juguetes (piñones). Otros usos en los que se aprovecha la fortaleza del material son: sacos para uso pesado, empaque de alimentos congelados, películas termoencogibles y cubiertas para invernadero.

**4.1.3 Sub-productos.** La unidad genera etileno de reciclo y grasa como subproductos:

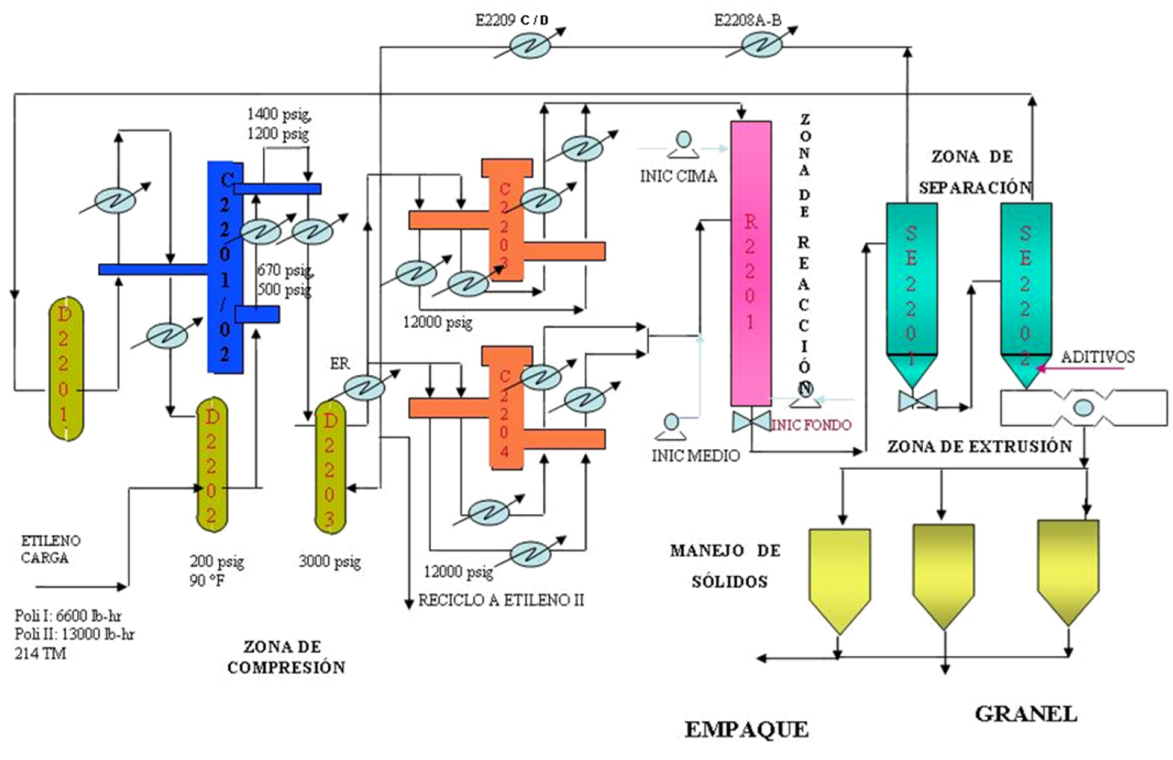
- **Etileno de Reciclo:** Es la corriente que se envía de regreso desde la Unidad Polietileno I hacia la Unidad Etileno II. Esto se lleva a cabo con el fin de descontaminar la corriente. El reciclo se realiza cuando se incrementa la concentración de sustancias como CO, CO<sub>2</sub>, metano, etano, propileno e inertes que contaminan la unidad y generan problemas en la operación y/o en el producto. Estas sustancias pueden provenir de la misma carga (metano, etano) o generadas en la reacción (CO<sub>2</sub>).
- **Grasa:** La grasa es polietileno en formación que no alcanza el peso molecular requerido dentro de las especificaciones de producto. Actualmente, esta grasa

se comercializa ya que se han encontrado usos en fabricación de plastilina y ligado con emulsiones asfálticas.

## 4.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO

El proceso para la fabricación de polietileno consta de 5 partes principales las cuales se pueden ver en la figura 11, estas son: compresión, reacción, separación, extrusión y transferencia y venta.

**Figura 11:** Diagrama general del proceso de fabricación de polietileno [5].



Para una mejor comprensión del proceso se puede observar la figura 11 en paralelo con la descripción del proceso que se realiza a continuación.

**4.2.1 Recibo de cargas y compresión.** El objetivo de esta sección es comprimir el etileno fresco de carga proveniente de la Unidad Etileno II y el etileno proveniente del separador de baja presión SE2202. Se realizan los siguientes procedimientos:

- **Reciclo de baja presión:** El gas es separado, en el tambor D2201, de los líquidos contaminantes que posea antes de entrar al C2201. Este compresor posee dos etapas de compresión, en la salida de cada etapa el gas es enfriado por unos intercambiadores de calor para evitar altas temperaturas que puedan afectar en el proceso.
- **Carga y compresión primaria:** La corriente de etileno proveniente del compresor C2201 nuevamente pasa por un tambor, el D2202, para separar los líquidos contaminantes que posea. El gas expulsado del tambor pasa a la primera etapa del compresor primario C2202, seguido de esto se enfría mediante un intercambiador de calor para posteriormente entrar a la segunda etapa de compresión del C2202. A la salida de la segunda etapa el gas es enfriado nuevamente. Finalmente, la corriente entra a la tercera etapa del compresor primario C2202. La descarga de la tercera etapa se enfría para ser enviada al tambor de carga de los compresores secundarios D2203.
- **Carga y compresión secundaria:** El etileno proveniente de la descarga del compresor primario C2202 (llega con una presión de 3000 psig) ingresa al tambor de carga D2203 de los compresores secundarios C2203 y C2204 en el cual se acumula para garantizar suministro de carga. A este tambor ingresa también etileno de reciclo proveniente del separador SE2201. La corriente unificada que sale del tambor pasa por los pre-enfriadores de los compresores secundarios en donde se enfría con agua refrigerada, la salida de corriente de gas se divide en dos.
  - **Compresor secundario C2203:** La corriente proveniente del primer pre-enfriador se dirige al C2203 que consta de dos etapas de compresión. En la salida de la primera etapa, el gas se enfría y continúa hacia la segunda etapa de compresión. La corriente de descarga de la segunda etapa se dirige a la cima del Reactor R2201.
  - **Compresor secundario C2204:** La corriente proveniente del segundo pre-enfriador se dirige al C2204 que consta dos etapas de compresión. En la salida de la primera etapa el gas se enfría y continúa hacia la segunda etapa de compresión. La corriente de descarga de la segunda etapa recibe una inyección de iniciador pivalato y finalmente se dirige a la parte media del

Reactor R2201.

- **Iniciadores:** Los iniciadores de la reacción se inyectan en cantidades controladas cuidadosamente en la cima, medio y fondo del reactor R2201 para iniciar la reacción y a su vez controlar la temperatura de la misma. Actualmente se utilizan dos tipos de iniciador:
  - **Inyección de iniciador Terbutil Perpivalato (Pivalato):** El iniciador pivalato se almacenan en cavas de enfriamiento y se transporta hasta los tambores de preparación de iniciador (en la medida que el proceso lo requiera), estos tambores se encuentran fuera del proceso, por lo que no se pueden observar en la figura 11. En los tambores de preparación de iniciador se diluye y homogeniza por agitación, de forma manual, el pivalato con el ciclohexano, posteriormente sale y se divide en dos corrientes, la primera se envía hacia la cima del Reactor R2201, la segunda se inyecta a la corriente de etileno proveniente de la descarga del compresor secundario C2204 que ingresa al reactor R2201 por la zona media.
  - **Inyección de iniciador Terbutil Peracetato (TPA):** El iniciador TPA se almacena en una cava de enfriamiento y se transporta a otro tambor de preparación de iniciador (diferente del anterior, en la medida que el proceso lo requiera). En el tambor se diluye y homogeniza por agitación el iniciador TPA con el ciclohexano y posteriormente sale y se envía la mezcla al fondo del reactor R2201.

**4.2.2 Reacción.** La reacción de polimerización del etileno para formar polietileno ocurre en el Reactor R2201.

Las corrientes de etileno gaseoso provenientes de la descarga de los compresores secundarios C2203/04 ingresan al reactor R2201 por la parte superior y media, respectivamente. La reacción de polimerización comienza cuando el iniciador reacciona con el etileno gaseoso.

- **Zona de cima:** El etileno gaseoso proveniente del compresor secundario C2203 entra por la parte superior del reactor. El iniciador pivalato llega directamente a

la zona de cima y reacciona con el etileno gaseoso iniciando la polimerización (unión de moléculas de etileno).

- **Zona Media:** El iniciador pivalato se inyecta directamente en la línea de gas de descarga del compresor secundario C2204, ubicada cerca del reactor, y entra a la zona media de reacción. La corriente que entra a la zona media de reacción se une con la corriente de gas-polímero que desciende proveniente de la zona de la cima. La corriente de gas-polímero calienta el iniciador permitiendo que la reacción de polimerización continúe en la zona media.
- **Zona de Fondo:** El iniciador TPA se inyecta en la zona de reacción de fondo y se mezcla con el etileno proveniente de la zona media para continuar la reacción de polimerización. El fluido, mezcla de etileno sin reaccionar y polietileno fundido, sale del fondo del reactor y continúa hacia el separador de alta presión SE2201.

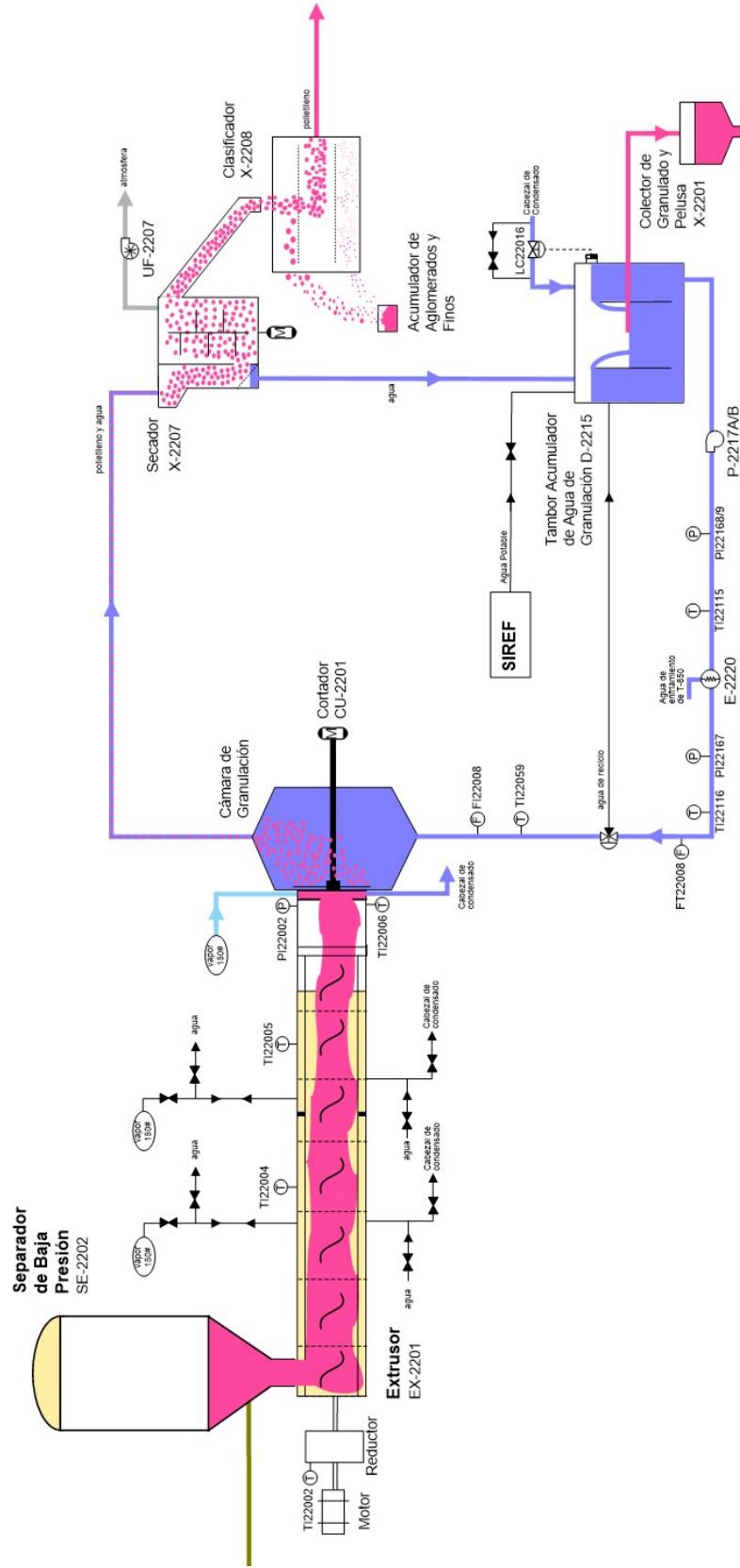
#### 4.2.3 Separación y reciclo

- **Separación de alta presión:** El efluente del reactor compuesto de polietileno fundido y de remanente de etileno gaseoso que no reaccionó, llega al separador de alta presión SE2201, donde se separa la mayor parte del etileno. Por la cima del separador se obtiene etileno gaseoso de reciclo de alta presión y por el fondo se obtiene polietileno fundido. A su vez, la corriente de etileno gaseoso de reciclo de alta presión arrastra polímeros de bajo peso molecular. Esta corriente sale por la cima del SE2201 e ingresa a un tambor acumulador de grasa en donde los polímeros de bajo peso molecular presentes en el gas se depositan en forma de grasa. En la salida de ese tambor el gas se enfría. Posteriormente se dirige hacia el otro tambor acumulador de grasa. La corriente de gas que sale por la cima del último tambor se divide en dos: una parte de la corriente se envía a la planta de Etileno II y la otra parte de la corriente de gas se enfría y se recircula al tambor de carga de los compresores secundarios. La corriente que sale por el fondo del SE2201 se envía al separador de baja presión SE2202.
- **Separación de baja presión:** El separador de baja presión SE2202 retira del polietileno fundido, proveniente del separador de alta presión SE2201. La cantidad de etileno remanente aún contenida. Por la cima del separador se obtiene

etileno gaseoso de reciclado de baja presión y por el fondo se obtiene un polietileno fundido más estable que en el SE2201. El etileno gaseoso se enfría para ser enviado al tambor separador de líquidos y pasar al tambor de carga del compresor C2201. El polietileno fundido que sale por el fondo del SE2202 recibe una corriente de aditivos e ingresa al Extrusor EX2201.

**4.2.4 Preparación de aditivos y extrusión.** El objetivo de esta sección es preparar los productos químicos (aditivos) que le imparten propiedades deslizantes, antioxidantes y/o antiadherentes al polietileno cuando este lo requiera. También se encarga de dar al producto su forma final de presentación (pellets). En la figura 12 se puede observar una gráfica general del proceso de extrusión que ayuda a la interpretación del funcionamiento del sistema, ya que el objetivo de este proyecto se centra en esta etapa crítica de la fabricación del producto, por lo cual es necesario tener una comprensión total.

Figura 12: Diagrama del proceso de extrusión de polietileno.



Fuente: ECOPETROL S.A.

- **Preparación e inyección de aditivos:** Los aditivos (lubrisol antioxidante, erucamida deslizante y/o sílice antiadherente) se almacenan en la bodega de la unidad de polietileno, se mezclan, calientan y homogenizan con aceite mineral para posteriormente ser inyectados por la parte baja del separador de baja presión SE2202.
- **Extrusión:** La mezcla de polietileno fundido y aditivos proveniente del SE2202 llega al Extrusor EX2201. Una vez que el tornillo del extrusor toma el material, comienza a mezclar y a desplazar el polietileno con los aditivos. Posteriormente, el polietileno pasa a través de la platina perforada (una pieza circular perforada de acero inoxidable que se calienta con vapor). El material sale de la platina perforada en forma de cuerdas largas y delgadas de sección circular (espaguetis) y entra a la cámara de granulación.

El material fundido ingresa a la cámara de granulación en donde se corta por el cortador CU2201, que le da el tamaño y forma final (pellets). La cámara de granulación recibe por la parte inferior una corriente de agua proveniente del tambor acumulador de agua de granulación que enfría los pellets de polietileno cortado hasta solidificarlos y los transporta hasta el secador. En el secador, los pellets se tamizan en una malla y se separan en dos corrientes. La primera corriente de agua y polietileno sólido fino atraviesa la malla y continúa para someterse a procesos posteriores de separación de finos y recirculación de agua de granulación. La segunda corriente de polietileno sólido grueso retenido por la malla se dirige a secado centrífugo y clasificación del pellet.

- **Separación de finos y recirculación de agua de granulación:** La corriente de agua y polietileno sólido fino que atraviesa la malla del secador retorna por gravedad al tambor acumulador de agua de granulación. Este tambor cuenta con una entrada de agua de reposición. Este tambor dispone de una caja para remover la pelusa de polietileno que flota en el agua. La pelusa se envía hacia el colector de granulado y pelusa. El agua expulsada del tambor se envía a la cámara de granulación.
- **Secado centrífugo y clasificación del pellet:** El polietileno sólido grueso retenido por la malla de paso se dirige a la parte de secado centrífugo y clasificación del pellet. Éste ingresa a una cámara de secado centrífugo que

le retira humedad al polietileno. En la cámara de secado centrífugo está conectado un extractor que extrae el aire saturado de agua y lo descarga a la atmósfera. Los pellets de polietileno salen del secador y llegan por gravedad al clasificador. El clasificador tiene dos mallas de diferente paso donde se tamizan y se clasifican según tamaño los gránulos de polietileno. El material grueso que retiene la malla superior sale del clasificador y cae al acumulador de finos y aglomerados donde se mezcla con el material fino que atraviesa las dos mallas. El material que se retiene entre la malla superior y la inferior que cumple con el tamaño requerido, sale del clasificador y llega por gravedad a las tolvas primarias de almacenamiento.

**4.2.5 Transferencia de producto.** El material proveniente del clasificador que cumple con el tamaño requerido llega a una válvula divergente la cual lo dirige a una de las dos tolvas primarias. La operación de las tolvas es alternada, es decir, opera una y luego la otra. Al salir de las tolvas primarias llega a una tolva donde se muestrea y analiza con el fin de decidir hacia dónde se envía. Si es calidad prime (producto que cumple todas las especificaciones) se envía hacia las tolvas de almacenamiento y si es calidad FE (fuera de especificación) se envía hacia las tolvas de empaque, el producto que sale de estas se envía al sistema de empaque, donde se almacena en bolsas de 25 kg y luego se guarda en la bodega de la planta para posteriormente ser vendido y despachado en vehículos a los correspondientes clientes. El material prime que se encuentra en las tolvas de almacenamiento puede tener dos destinos, las tolvas de empaque o la tolva de suministro que despacha el producto directamente en un vehículo de transporte (carro tanque). Si llega a las tolvas de empaque repite el mismo proceso que el material FE.

---

## 5. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN [6]

---

Cómo se mencionó anteriormente, el proyecto se centra en este sistema tan crítico para la fabricación de polietileno, teniendo claro el proceso explicado en la sección 4.2.4, se estudian detalladamente los equipos que componen el sistema para entender claramente su funcionamiento y facilitar así la identificación de las funciones de protección.

### 5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN

**5.1.1 Extrusor primario EX-2201.** El EX-2201 es un extrusor de alimentación en caliente con un tornillo de 12" de diámetro y 163.2" de longitud de la rosca, accionado por un motor de velocidad variable de 400 H.P. y 480 Vdc. El movimiento se transmite al tornillo por medio de un reductor de engranajes. La cabeza está compuesta del sistema de cuchillas accionadas por un motor eléctrico que se puede separar del cuerpo principal o barril.

La capacidad del extrusor varía dependiendo del índice de fusión del polietileno alimentado desde el fondo del separador de baja presión, diseñado para ratas de 4000 a 8000 lb/h de polietileno. El extrusor consta de las siguientes partes:

- **Motor principal – MEX2201:** El motor del extrusor primario es de velocidad variable de 400 H.P., 460 Vdc y 900 rpm. El motor principal posee un ventilador movido por un motor de 10 H.P., durante todo el tiempo que opere el motor, para el enfriamiento de los internos del motor principal.
- **Reductor de engranajes:** El reductor es una unidad de engranajes en espiral, con una relación de 15.05 a 1, el cual proporciona al tornillo una velocidad de 100 rpm basados en la máxima velocidad del motor del extrusor (1500 rpm). Cuenta con un sistema de lubricación que consta de una bomba, accionada por un motor de 5 H.P., de un filtro, de un enfriador y de un interruptor de bajo flujo.
- **Tolva de alimentación:** La tolva o caja de alimentación es la abertura de entrada al tornillo. Para una operación satisfactoria es importante mantener el flujo de vapor a la camisa de la tolva y a la pieza de transición, situada entre la tolva de

alimentación y el separador de baja presión, ya que un punto frío podría ocasionar el enfriamiento y solidificación del polietileno y taponar progresivamente la tolva.

- **Tornillo del extrusor:** El tornillo del extrusor sirve como un medio para transportar y presionar el polietileno fundido hacia la platina perforada. La longitud total de la parte roscada del tornillo es igual a 183 pulgadas. Su velocidad y por tanto la capacidad del extrusor se controla regulando la velocidad del motor principal.
- **Cambiador de mallas:** El “Screen changer” del extrusor posee mallas para retención de pequeñas partículas sólidas y contaminantes provenientes del reactor (polietileno quemado). El cambiador de mallas tiene un sistema para calentamiento con vapor y tiene instalado un sistema hidráulico automático para extender y retraer unas abrazaderas que mantienen herméticamente cerrada esta sección.
- **Cabeza del extrusor y platina perforada:** La cabeza del extrusor, unida con tornillos al cambiador de mallas, tiene un cono en la parte de atrás que recibe el polietileno fundido, después que pasa por el paquete de mallas y por la platina de desvío, y lo dirige hacia la platina perforada. La platina perforada es un plato plano de acero inoxidable con 375 huecos de 0.11 pulgadas de diámetro, recubierto con una capa de carburo de tungsteno, con el objeto de reducir el desgaste de las cuchillas del cortador; el polietileno es forzado, a través de los huecos, al área de corte. La cabeza del extrusor debe estar siempre con vapor de calentamiento para prevenir el taponamiento parcial de los huecos durante su operación, lo cual cambiaría la forma de los gránulos.
- **Cámara de agua de granulación:** El agua de enfriamiento de los gránulos de polietileno entra por el fondo de la cámara y sale junto con los gránulos por la parte superior hacia el secador centrífugo. La cámara posee una ventana que se utiliza para cambiar las cuchillas y para limpiar la platina perforada y posee una válvula para drenar el agua cuando exista parada del equipo. La cámara de agua tiene instalada una válvula de seguridad, ajustada a 70 psig, que aliviará en caso de que se pare el flujo de agua y el calor de calentamiento del dado logre la ebullición del agua en la cámara.
- **Cortador o granulador:** El polietileno es forzado a la cámara de agua a través

## *DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN [6]*

---

de la platina perforada y a medida que emerge por sus orificios se corta en gránulos de 1/8" de longitud, utilizando un cortador, el cual rota a una velocidad de 200 a 1.800 rpm. Al cortador se le pueden instalar de 4 a 8 cuchillas (de acuerdo a la rata de producción), las que se ajustan contra la platina perforada. Esta unidad está montada sobre un carro de cuatro ruedas ajustables verticalmente, que permite desplazarlo sobre un riel de unos 10.5 pies. El eje del cortador es impulsado por un motor de 40 H.P., 460 vdc y velocidad variable, máximo 1200 rpm. Es importante efectuar los ajustes requeridos a la velocidad del cortador, del tornillo del extrusor (rata de alimentación) y a la temperatura del agua de enfriamiento de los gránulos. Todos estos factores tienen relación directa sobre la forma final de los gránulos de polietileno, así como también, el filo de las cuchillas y sus ajustes sobre la platina perforada.

**5.1.2 Unidad de secado.** La unidad secadora separa el agua de los gránulos de polietileno que vienen del extrusor primario y luego los seca para enviarlos al clasificador de gránulos. Esta unidad se compone de:

- Una malla donde se separa por gravedad el agua, drenándose por un canal interno junto con los gránulos de menos de 1/8" para ir al recipiente de agua de granulación.
- Un secador centrífugo X-2207 el cual tiene un rotor vertical con aspas que giran a 380 rpm, impulsado por un motor de 10 H.P. y 460 vdc. Su capacidad máxima es de 22.000 lb/hr. Las aspas del rotor están diseñadas para garantizar no atrapamiento de pellets en las mismas.
- Un extractor UF-2207, para retirar el aire saturado con agua dentro del secador centrífugo.

Además, posee platinas deflectoras localizadas en el área de pre-secado, estas platinas evitan que el agua y el polímero choquen directamente con la malla de pre-secado y permite que mayor flujo de agua sea separado del polímero, no entre a la cámara de secado y se acumule en la parte inferior del secador. Las puertas de esta unidad de secado garantizan hermeticidad, evitando así derrames de agua.

## *DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN [6]*

---

El sistema también posee un acumulador de aglomerados, el cual está instalado en la parte superior del secador, posee unas barras cilíndricas para atraparlos; el retiro se realiza por medio de una válvula operada por medio de un switch local que está ubicado en la misma plataforma del acumulador de aglomerados. El retiro de aglomerados por medio de la válvula evita el contacto manual con el producto y permite mayor seguridad ocupacional en el proceso.

Los aglomerados son enviados a una tolva de disposición ubicada en el piso la cual posee una válvula de drenaje para retiro del agua presente y una compuerta deslizante lateral para el retiro y disposición de los aglomerados, de esta forma se evitan derrames en el piso.

**5.1.3 Clasificador de gránulos.** El clasificador de gránulos X-2208, consta de dos mallas horizontales superpuestas que se mueven en los diferentes planos a amplitud y frecuencias bajas. La primera de las mallas separa los gránulos grandes y los aglomerados de estos; la segunda de huecos más pequeños separa los finos y el polvo. El movimiento se lo produce un motor de 2 HP, 1400 rpm y 460 vdc y se transmite por medio de una excéntrica. Su capacidad es de 14000 lb/h.

## **5.2 PLC ENCARGADO DEL CONTROL Y SEGURIDAD DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN**

El PLC encargado del control y seguridad del proceso de extrusión pertenece a la familia de controladores Allen-Bradley ControlLogix 5000. Este PLC fue entregado a ECOPETROL S.A. junto con el sistema de extrusión y toda la instrumentación asociada a él. Este PLC se configura y programa con el software RSLogix 5000, del cual se habla en la sección 5.3.1.

En la tabla 1 se pueden observar las principales características del PLC.

**Tabla 1:** Características del PLC.

Descripción	Característica	Cantidad
Alimentación	24 VDC	1
Módulo de entradas analógicas	16 entradas	1
Módulo FLEX de entradas analógicas	8 entradas	1
Módulo FLEX RTD de entradas analógicas	8 entradas	4
Módulo de entradas digitales	16 entradas	6
Módulo de salidas analógicas	8 salidas	2
Módulo de salidas digitales	16 salidas	4
Módulo Ethernet	-	1
Módulo Modbus	-	1
Pantalla táctil	Con software Farrel	1

Fuente: ECOPELROL S.A.

### 5.3 LÓGICA DE PROGRAMACIÓN DEL PLC

**5.3.1 RSLOGIX 5000.** El software RSLogix 5000 es la única aplicación para configurar, programar y mantener la totalidad de la familia de controladores Allen-Bradley Logix 5000. Este software permite programar de forma sencilla y práctica, permitiendo:

- Fácil configuración de los dispositivos con asistentes gráficos.
- Programación simplificada con múltiples lenguajes.
- Crear códigos paralelamente y poder compararlos.
- Proteger el diseño y ejecución del contenido gracias a la protección basada en licencias para garantizar que solo usuarios autorizados puedan ver, modificar o ejecutar el código.

El RSLogix 5000 se encuentra presente en un equipo de cómputo del Departamento de Petroquímica, en la unidad de Polietileno I, al cual tiene acceso sólo el ingeniero

de confiabilidad del área de Instrumentación y Control para garantizar así la seguridad del sistema de extrusión, evitando que terceros puedan modificar el código de programación y en consecuencia afectar la integridad del sistema [1].

**5.3.2 Contenido y extensión.** La correspondiente programación fue extraída del controlador en un documento PDF para facilitar el desarrollo del proyecto y evitar posibles incidentes que se puedan generar si se manipula directamente sobre el PLC. Este documento cuenta con 225 hojas de programación, en las que se encuentra la definición de variables y alarmas del sistema, las asignaciones de memoria, la programación correspondiente para controlar el proceso de extrusión y sus funciones de protección. En esta programación se reciben las señales tanto de las entradas analógicas como las digitales provenientes de los diferentes sensores en campo encargados de vigilar el proceso; en total el sistema cuenta con 112 entradas, de las cuales 73 son digitales y 39 analógicas. Asimismo, se controla el proceso mediante las salidas del sistema que en total suman 61, siendo 49 digitales y las 12 restantes analógicas.

---

## 6. CONSTRUCCIÓN DE ENTREGABLES

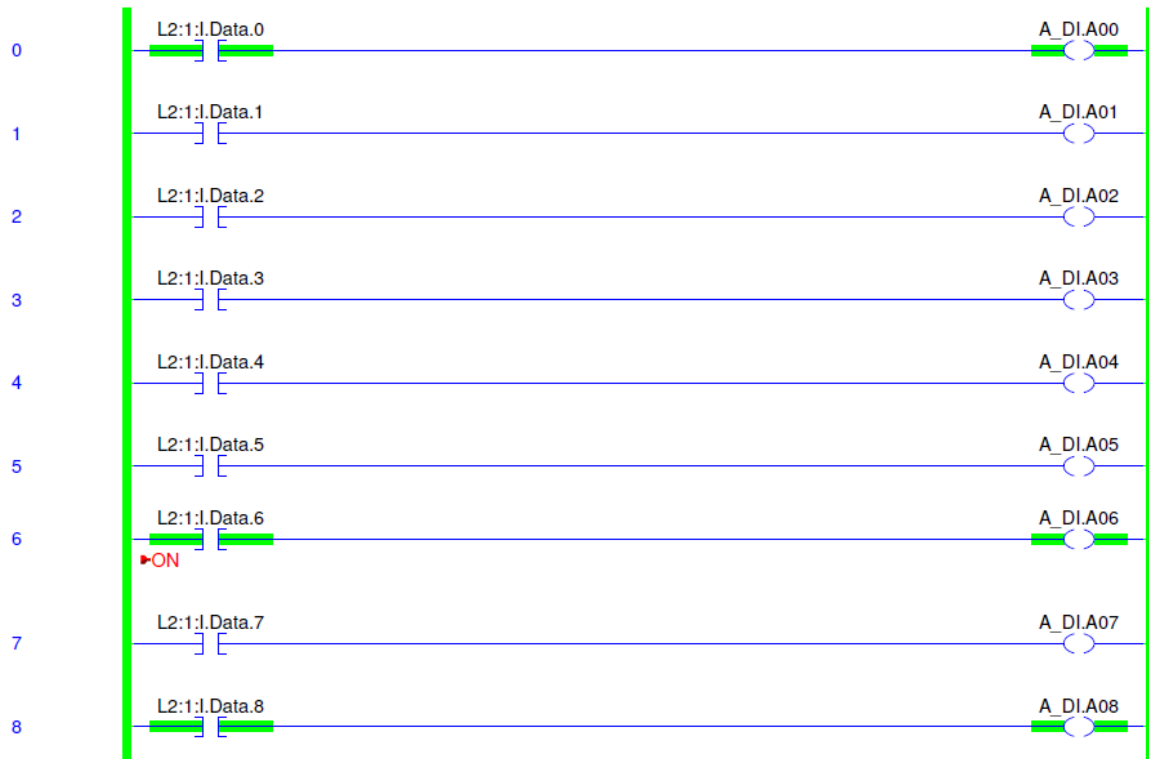
---

### 6.1 DOCUMENTACIÓN DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA

Uno de los pasos importantes para lograr los objetivos es la identificación de las entradas y salidas dentro de la programación, es indispensable conocer qué variables dentro del código corresponden a las señales generadas por los sensores que miden las variables físicas del sistema, ya que con esto se puede determinar la relación entre entradas y salidas, los efectos o consecuencias que se generan a partir de un cambio del valor de una variable, siendo esto la esencia para el reconocimiento de las funciones de protección del sistema.

Es común que los programadores comenten dentro de su código las variables que usan de tal manera que sea de fácil entendimiento o modificación si es necesario. Muchas veces el nombre de estas variables corresponde con la función que desempeñan, pero en este caso esto no sucede. Dentro del código no se encontró ninguna documentación que pueda servir para identificar las variables, en cambio, estas están asociadas a los módulos de conexión del PLC, como se puede observar en la siguiente figura:

**Figura 13:** Variables de entrada digital en la programación del PLC.



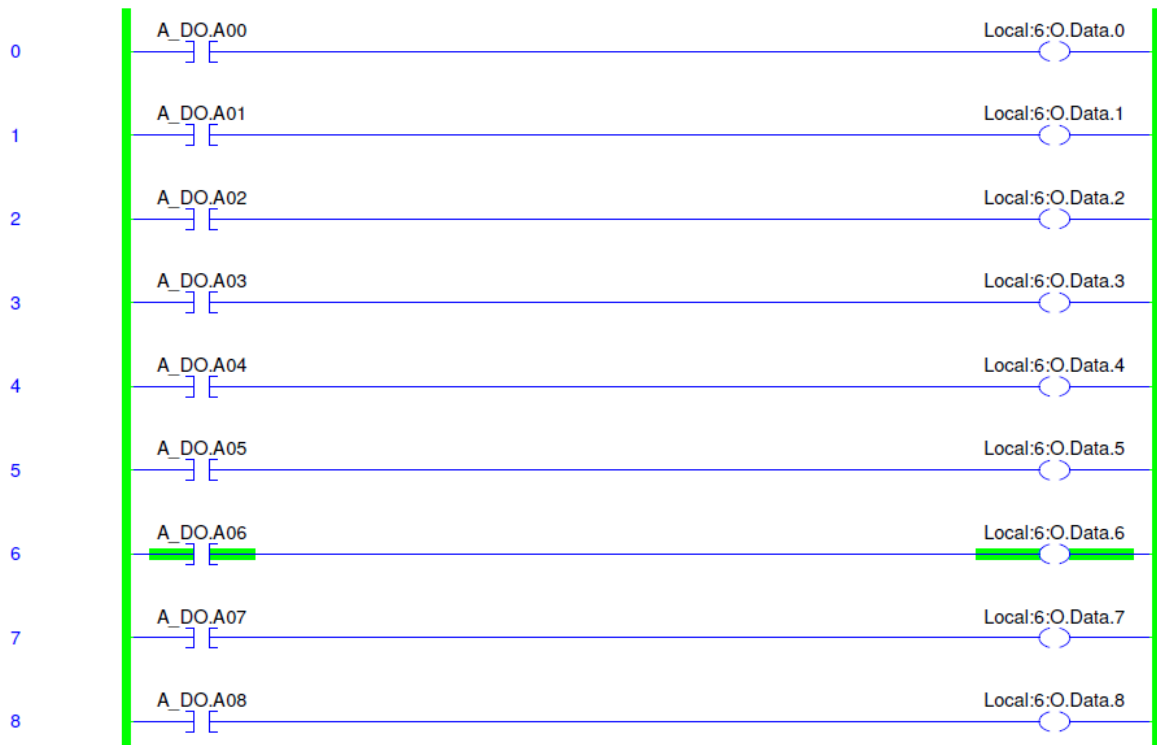
Fuente: ECOPETROL S.A.

En la figura 13, los contactos de la parte izquierda corresponden a las direcciones físicas donde se reciben los valores de los sensores en campo y las bobinas en la parte derecha a las variables que tomaran ese valor y serán usadas dentro del código, este caso, sólo representan variables digitales. Como se puede observar, el nombre de estas no asocia o indica a qué corresponde, solo, como se mencionó anteriormente, están asociadas a los módulos de entradas, esto es, el nombre de la variable indica a qué módulo y canal está conectado el correspondiente sensor en campo. Para identificar esto se usa el nombre de la variable asociado a la bobina, para ilustrar la manera en que se realiza se tomará como ejemplo la primera bobina A\_DI.A00, así:

En la variable A\_DI.A00, la primera parte "A", no se toma en cuenta, seguido de esto, la letra "D" indica que es una señal digital, la letra "I" muestra que es una entrada, la letra "A" indica a cuál módulo entra la señal, esta corresponde al módulo 1 y los últimos dos números "00" indican cuál canal del módulo recibe la señal, para este ejemplo, el canal 0.

Teniendo lo anterior claro, la identificación de las señales digitales de salida se hace de igual manera, en la figura 14 se puede observar algunas variables de salida en el código:

**Figura 14:** Variables de salida digital en la programación del PLC.



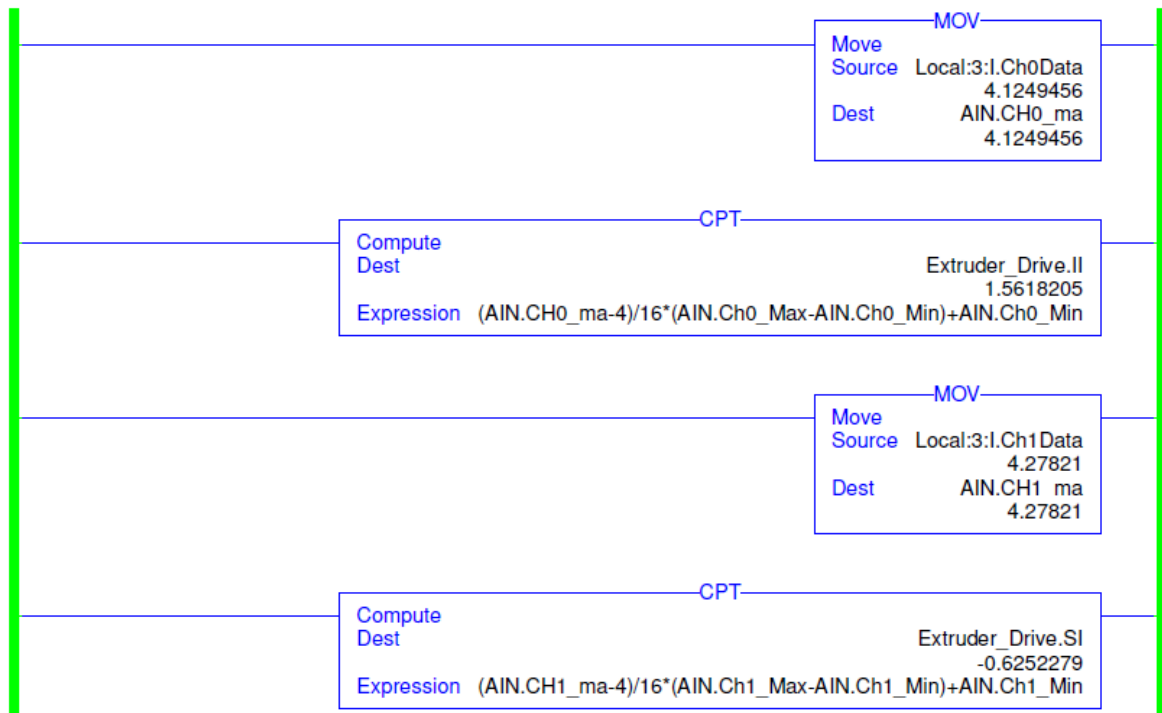
Fuente: ECOPETROL S.A.

Siguiendo la idea anterior se tiene:

En la variable A.DO.A00: La letra “D” indica que es una señal digital, la letra “O” muestra que es una salida, la letra “A” indica por cuál módulo sale la señal, esta corresponde al módulo 1, y los últimos dos números, en este caso “00”, indican por cual canal es enviada, para este ejemplo el 0.

Para este tipo de señales (digitales) la identificación se hace de manera muy sencilla pues solo pueden tomar dos valores (0 o 1) y esto es representado por una simple bobina y su respectivo contacto dentro del código, caso contrario a las señales analógicas, las cuales pueden tomar un rango de valores que no se pueden representar por el estado de una bobina, para estas señales es necesario usar bloques más complejos para poder adquirir el valor medido y tomar decisiones con base en este, dichos bloques se pueden observar en la figura 15.

**Figura 15:** Variables de entrada analógica en la programación del PLC.



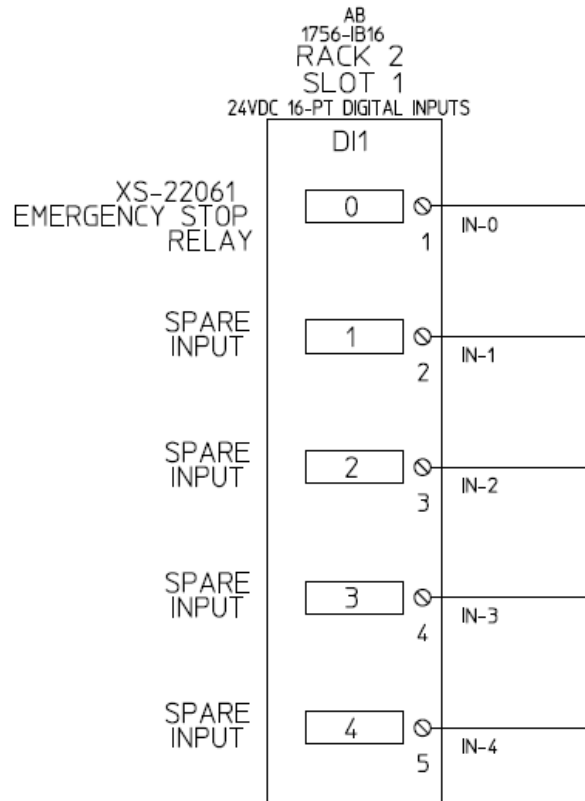
Fuente: ECOPEPETROL S.A.

Es necesario utilizar dos bloques: MOV y CPT, los cuales se encargan de recibir señal proveniente de los sensores y calcular su valor mediante una expresión matemática ya definida para asignarlo a una variable que pueda ser usada dentro del código. Una vez conocidos los bloques, hay que identificar la variable que contiene la información para, al igual que las digitales, asociarlas a su respectivo módulo y canal, esta identificación se realiza con la variable que recibe el valor calculado, tomando como ejemplo el bloque de la línea 0:

En la variable AIN.CH0\_ma, se identifica que la señal es analógica mediante la "A" y una entrada, "IN", proveniente del canal 0, "CH0".

Teniendo una vez asociadas todas las variables del sistema (173) a su respectivo módulo y canal, se consulta el documento donde se encuentran los planos de conexión de los sensores a los respectivos módulos del PLC para asociar las variables de la programación con las entradas y salidas correspondientes, en la figura 16 se observa una parte de estos planos.

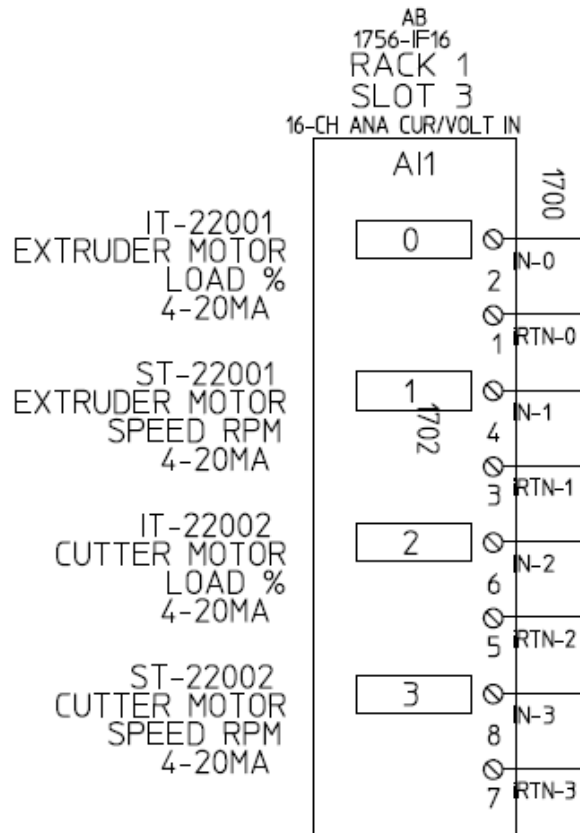
**Figura 16:** Plano de conexiones de las entradas digitales con el módulo.



Fuente: ECOPETROL S.A.

En la figura 16 se puede observar que el módulo mostrado está identificado como DI1, lo que indica que es el módulo 1 de las entradas digitales denotadas como IN-0, IN-1, IN-2 etc., lo que muestra el canal al cual se encuentran conectadas, continuando el primer ejemplo, A\_DI.A00, el cual corresponde al módulo 1 y canal 0, se asocia a la información suministrada por el plano de conexionado, por lo tanto esta señal corresponde a la entrada “EMERGENCY STOP RELAY” o “relé de parada de emergencia”, identificado en campo por el TAG XS-22061. De igual manera ocurre para las entradas analógicas, en la figura 17 se puede observar una parte de los planos de conexionado.

Figura 17: Plano de conexiones de las entradas analógicas con el módulo.



Fuente: ECOPETROL S.A.

Continuando con el primer ejemplo, por analogía se dice que la variable AIN.CH0.ma corresponde a “EXTRUDER MOTOR LOAD %” o “porcentaje de carga del motor”, la cual es enviada por el sensor identificado con el TAG IT-22001. Dentro de los módulos de entradas analógicas, se encuentran presentes 5 módulos conocidos como “Flex” los cuales están identificados con otros nombres: AI1, RTD1, RTD2, RTD3 y RTD4, sin embargo, la diferencia radica en que las variables contenidas en el código contienen la palabra “Flex”, por ejemplo: AIN\_Flex.CH0; esto no tiene efecto alguno sobre la manera en cómo se realiza su asociación.

Se realiza el proceso anterior para la totalidad de las variables y finalmente se genera el documento “Entradas y salidas del sistema de extrusión” (anexo A) donde

se almacena toda la información.

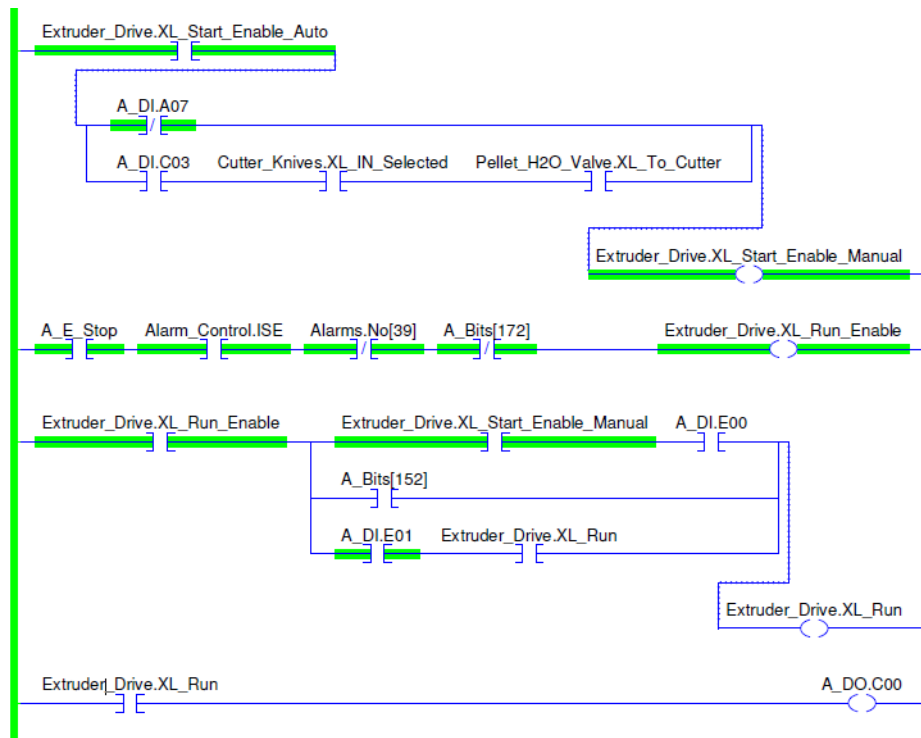
## **6.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS FUNCIONES DE PROTECCIÓN Y PERMISIVOS DEL SISTEMA**

Una vez se conocen las variables usadas en la programación del PLC, se procede con la identificación de las funciones de protección y permisos para poder elaborar la documentación final que es el objetivo de este proyecto.

**6.2.1 Identificación de permisos.** Como se mencionó en la sección 3.4, los permisos son las condiciones que se deben cumplir para que se pueda ejecutar una acción, como por ejemplo el arranque de un motor. Teniendo claro esto, para conocer los permisos del sistema es necesario identificar las variables de salida que afectan los elementos finales del sistema, como por ejemplo el motor principal del extrusor identificado con los TAG MEX2201.

Consultado el documento del anexo A, se identifica que la variable que controla el arranque o parada del MEX2201 es A.DO.C00, teniendo claro esto se realiza la búsqueda de esta variable dentro de la programación, arrojando como resultado lo que se observa en la figura 18.

**Figura 18:** Programación del PLC del sistema de extrusión.



Fuente: ECOPETROL S.A.

Se puede ver claramente que para que la variable A.DO.C00 que se encuentra en la última línea de la figura 18 sea activada, es necesario que la variable Extruder\_Drive.XL\_RUN esté activada, así mismo, en la línea anterior se aprecia que para que esta sea activada, es necesario que se cumplan dos condiciones:

- Que la variable Extruder\_Drive.XL\_Run\_Enable esté activada.
- Que las variables Extruder\_Drive.XL\_Start\_Enable\_Manual y A\_DI.E00, o que la variable A\_Bits[152], o que A\_DI.E01 y Extruder\_Drive.XL\_Run estén activadas.

Con lo visto en la sección anterior y recurriendo al documento de entradas y salidas del sistema, se puede reconocer que A\_DI.E00 y A\_DI.E01 hacen parte de señales de entrada digitales provenientes de instrumentos en campo los cuales son: “pulsador arranque del extrusor” y “pulsador parada del extrusor” respectivamente, por

lo tanto se considera que el pulsador arranque del extrusor es un permisivo para el arranque del MEX2201.

En la línea donde se encuentra el pulsador parada del extrusor lo acompaña la variable `Extruder_Drive.XL_Run` que cumple la función de enclavamiento, una vez la variable `Extruder_Drive.XL_Run` es activada, ella misma permite que siga estando activada así las otras condiciones hayan dejado de cumplirse, a menos que el pulsador parada del extrusor sea presionado y `A_DI.E01` sea desactivada, ya que en este caso se cuenta con un pulsador normal cerrado. Por este motivo, el pulsador parada del extrusor no se considera permisivo puesto que no es requisito para que `Extruder_Drive.XL_Run` sea activada, en cambio, se considera que detiene el MEX2201 una vez esté operando.

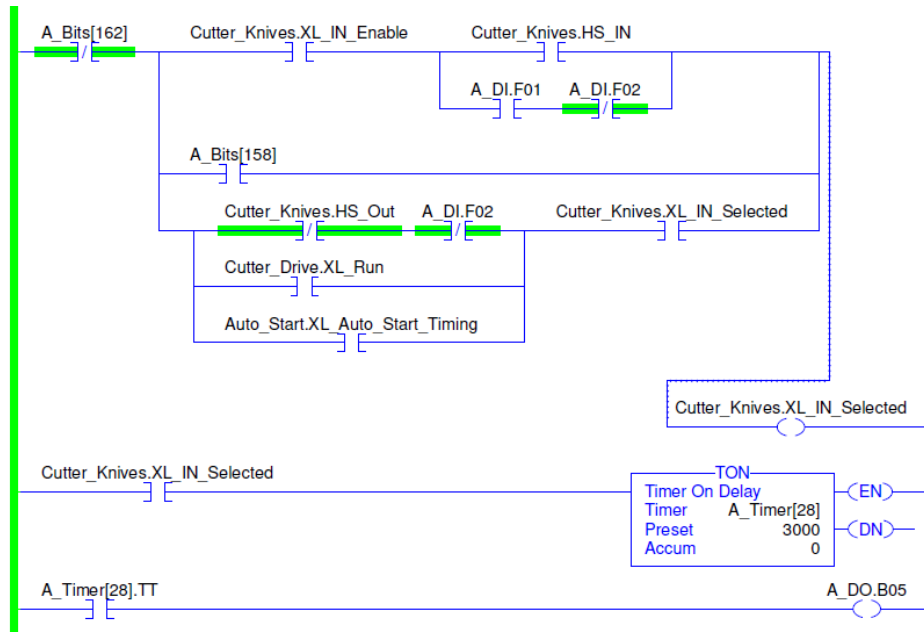
Junto con `A_DI.E00` es necesario que `Extruder_Drive.XL_Start_Enable_Manual` esté habilitada para permitir la activación del MEX2201, en la figura 18 se puede observar que se deben cumplir ciertas condiciones para que esta variable sea habilitada:

- La activación de la variable `Extruder_Drive.XL_Start_Enable_Auto`.
- La desactivación de la variable `A_DI.A07`, pues se encuentra negada, eso se evidencia por el símbolo del contacto que la representa o la activación de la variable `A_DI.A07` y la activación de las variables `A_DI.C03`, `Cutter_Knives.XL_IN_Selected` y `Pellet_H2O_Valve.XL_To_Cutter`.

Analizando la segunda condición, al igual que en el caso anterior, se reconoce que `A_DI.A07` y `A_DI.C03` hacen parte de señales de entrada digitales que corresponden a: “Relé cámara de cortador cerrada” y “Variador de velocidad del cortador corriendo”, por lo tanto un permisivo para el arranque del MEX2201 es que la cámara de cortador se encuentre abierta, como se mencionó anteriormente, la variable se encuentra negada, haciendo referencia a un contacto normal cerrado, que el MCU2201 se encuentre encendido también es un permisivo.

Hace falta aclarar a qué corresponden las señales `Cutter_Knives.XL_IN_Selected` y `Pellet_H2O_Valve.XL_To_Cutter`, para esto se realiza la búsqueda dentro de la programación, dando como resultado para `Cutter_Knives.XL_IN_Selected` lo observado en la figura 19.

**Figura 19:** Activación de la variable Cutter\_Knives.XL\_IN\_Selected.



Fuente: ECOPETROL S.A.

Para que se active la variable Cutter\_Knives.XL\_IN\_Selected es necesario que se cumpla:

- A\_Bits[162] debe estar desactivada, ya que se encuentra negada.
- Que Cutter\_Knives.XL\_IN\_Enable y Cutter\_Knives.HS\_IN o A\_DI.F01 y A\_DI.F02 estén activas, o que A\_Bits[158] esté activo, o que Cutter\_Knives.XL\_IN\_Selected (funcionando como enclavamiento) y Cutter\_Knives.HS\_Out y A\_DI.F02 o Cutter\_Drive.XL\_Run o Auto\_Start.XL\_Auto\_Start\_Timing estén activas.

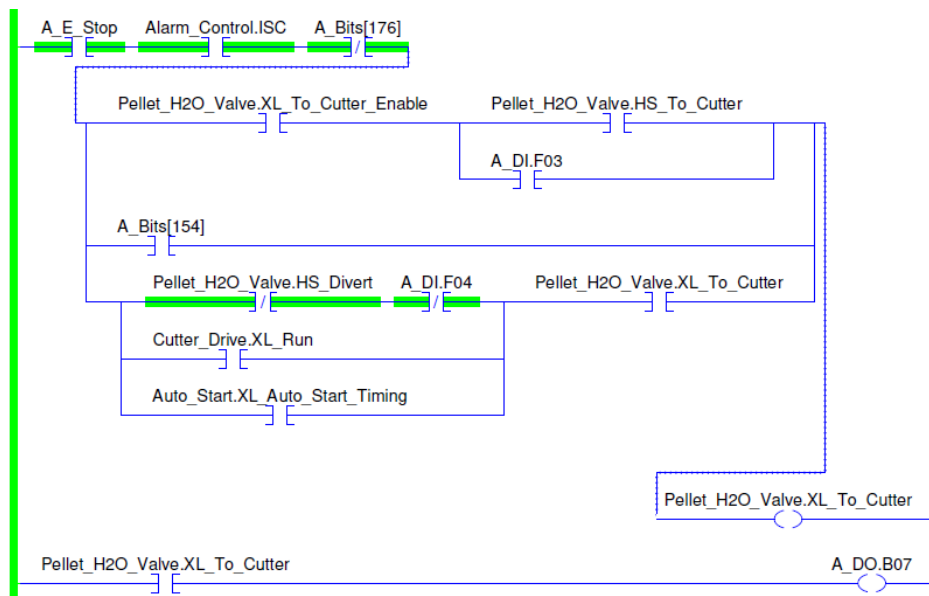
Repitiendo el procedimiento, se debe realizar una búsqueda para cada una de las variables mencionadas anteriormente y así obtener los permisos que permiten que Cutter\_Knives.XL\_IN\_Selected sea activada, por efectos prácticos no se muestra ya que es repetitivo y bastante extenso.

En las dos últimas líneas se observa que Cutter\_Knives.XL\_IN\_Selected activa un bloque que funciona como temporizador, pasado el tiempo establecido en “Preset”,

que se encuentra en milisegundos, activa la salida A.DO.B05 que corresponde a “relé cuchilla dentro”. Las cuchillas en la posición dentro actúan como permiso para el MEX2201, no se toman en cuenta los permisos de Cutter\_Knives.XL\_IN\_Selected para el MEX2201 pues se entiende que si la variable mencionada está activa, estos ya tuvieron que haber sido cumplidos.

Realizando el mismo procedimiento con Pellet\_H2O\_Valve.XL\_To\_Cutter se llega a la figura 20.

**Figura 20:** Variable Pellet\_H2O\_Valve.XL\_To\_Cutter.



Fuente: ECOPETROL S.A.

Al igual que con Cutter\_Knives.XL\_IN\_Selected se deben determinar todos los permisos de Pellet\_H2O\_Valve.XL\_To\_Cutter pero de igual manera el procedimiento no es mostrado. Se obtiene como resultado que la válvula de agua de “pellet” debe estar en dirección al cortador para permitir el arranque del MEX2201.

Teniendo claro el procedimiento, esto se aplica a todas las variables de los principales componentes del sistema de extrusión, omitiendo componentes menos importantes como luces pilotos e indicadores visuales.

**6.2.2 Identificación de las funciones de protección.** Este procedimiento es muy similar al realizado en la sección anterior, con la diferencia que las funciones de protección no permiten el arranque de los equipos, por el contrario, buscan apagarlos, esta es la manera en como actúan, desenergizan todos los componentes que se puedan ver afectados por una condición potencialmente peligrosa.

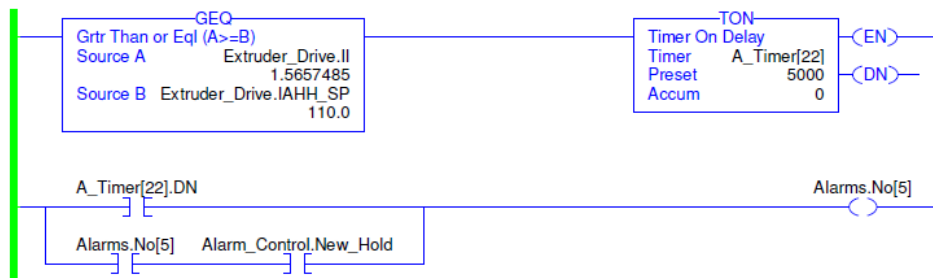
Como se observa en la figura 18, las únicas variables que desactivan a Extruder\_Drive.XL\_Run una vez esté en funcionamiento son el pulsador de parada y Extruder\_Drive.XL\_Run\_Enable, a su vez, esta última necesita de las siguientes variables para su activación: A\_E\_Stop, Alarm\_Control.ISE, Alarms.No[39] y A.Bits[172].

A\_E\_Stop corresponde al pulsador de parada de emergencia que al ser pulsado ocasiona que todos los equipos sean desenergizados y así el sistema es detenido.

Es indispensable repetir el procedimiento que se realizó en la sección anterior con las señales restantes para identificar las entradas que desenergizan los equipos del sistema de extrusión y así poder construir la matriz causa efecto y el certificado de pruebas funcionales IPF.

Hay que recordar que el sistema también cuenta con variables analógicas que intervienen en las funciones de protección, siempre que alguna variable se desvíe de su setpoint es necesario que se tomen medidas, para conocer los valores máximos o mínimos que puede poseer se consulta la programación, un ejemplo de los resultados encontrados se evidencia en la figura 21.

**Figura 21:** Valor máximo de Extruder\_Drive.II.



Fuente: ECOPETROL S.A.

Para este caso, Extruder\_Drive.II hace referencia al porcentaje de carga del motor del extrusor, en la figura 21 se aprecia que el valor de esta variable es comparado con Extruder\_Drive.IAHH.SP que tiene un valor de 115, en esta comparación se utiliza la desigualdad mayor o igual ( $\geq$ ), y si se cumple es activado un temporizador que luego de cumplir el tiempo establecido (5 segundos) acciona Alarms.No[5] que lleva al apagado del MEX2201, por lo tanto, el máximo valor permitido para el porcentaje de carga del motor es de 110%. El proceso es repetido para todas las variables analógicas.

### **6.3 CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ CAUSA EFECTO**

Una vez identificados todos los permisivos y funciones de protección del sistema de extrusión el siguiente paso es la elaboración de la matriz causa efecto, donde se consigna todo lo anteriormente mencionado. Está dividida en dos partes, la primera se centra en el MEX2201 y la segunda en el MCU2201 (motor del cortador).

Continuando con el ejemplo de Extruder\_Drive.XL\_RUN que activa el motor del extrusor. Se identificaron las siguientes señales que actúan como permisivos:

- Pulsador arranque del extrusor.
- Relé cámara del cortador cerrada.
- Variador de velocidad del cortador corriendo.
- Relé cuchilla dentro.
- Relé válvula de agua de pellet a cortador.

Adicionalmente, se identificó que el pulsador de parada de emergencia desenergiza el motor y que el límite para la carga del extrusor es de 110%. Con la información obtenida se empieza a construir la matriz, se identifican los TAG de cada uno de los sensores recurriendo al anexo A y se asignan los servicios, también se aclaran las definiciones a usar, que en este ejemplo corresponden a “P” de permiso y “S” de paro de equipo, dando como resultado lo observado en la figura 22.

Para este caso, en la sección Notas se hace la aclaración que la condición “cámara de corte no cerrada” facilita la purga del extrusor cuando se encuentre fuera de servicio, además que si este está activo no es necesario que las condiciones “motor del cortador en funcionamiento”, “cuchillas del cortador en posición IN” y “válvula

## *CONSTRUCCIÓN DE ENTREGABLES*

---

de agua de pelletización en dirección al cortador“ estén activas, estas últimas solo son necesarias para el arranque manual, ya que el sistema cuenta con un arranque automático que las realiza si es activado. Todo lo anterior es aclarado con la ayuda del ingeniero a cargo y algunos operadores del sistema.

De esta manera se consignan toda la información del sistema, arrojando como resultado el documento del anexo B.



#### 6.4 DOCUMENTACIÓN DEL CERTIFICADO DE PRUEBAS FUNCIONALES IPF


Al igual que con la matriz causa efecto, ya se cuenta con la totalidad de la información requerida para la creación de este certificado, pero a diferencia de la MCE en este documento no se consignan los permisivos, solo las IPF de manera más detallada, describiendo cada Interlock y la forma de comprobar su funcionamiento, las causas y efectos que conlleva, los límites de las variables analógicas y los módulos y canales por los cuales viajan las señales para corroborar también el correcto desempeño de estos componentes.

Para ilustrar la manera en cómo se consigna la información se puede recurrir a la figura 24.

Retomando el ejemplo con la variable Extruder\_Drive.II que representa la carga del motor del extrusor, se procede a realizar la descripción detallada del interlock relacionado con la función de protección identificada anteriormente. Es necesario indicar el límite del umbral, en este caso corresponde al 110 %, también se debe aclarar cuál sensor interviene, para la carga del extrusor es el instrumento con el TAG IT-22001.

Seguido de esto se describen las acciones que ocurren por causa de la ejecución del interlock, como se mencionó anteriormente, desenergiza el MEX2201, adicionalmente se reconocieron dos acciones más: se desenergiza, 10 minutos después, el ventilador de refrigeración del MEX2201 y las dos bombas de adición de aditivos. El diagrama de referencia es el RSLogix 5000 Project Report que corresponde a la programación del PLC.

**Figura 23:** Construcción del certificado de pruebas IPF, parte 1.


 DESCRIPCIÓN DE INTERLOCK'S EX2201 PPQ-PTB-IPF-			
No. DE INTERLOCK	DESCRIPCIÓN	DIAGRAMA DE REFERENCIA	NOTAS
105 CORTE POR ALTA ALTA SOBRE CARGA DEL EXTRUSOR IT-22001	Cuando exista alta alta sobre carga del extrusor ( $\geq 110\%$ ), sensada en campo por el sensor IT-22001, el PLC ejecutará las siguientes acciones:  1. Actúa el driver del motor MEX-2201 y desenergiza el motor del extrusor. 2. 10 minutos despues de desenergizar el MEX-2201 se desenergiza el motor del ventilador de enfriamiento. 3. Se desenergizan las bombas de aditivos P-2232A y P-2232B. 4. Alarma visual y sonora de alta prioridad en gabinete del extrusor, registro en histórico de eventos en touch panel. 5. Indicación visual en el DCS de disparo del EX-2201	RSLogix 5000 Project Report	

Fuente: ECOPETROL S.A.

En la segunda parte del certificado, figura 24, se deben registrar las condiciones iniciales que se deben simular para realizar la prueba del interlock, estas condiciones corresponden al estado inactivo (normal) de los demás interlock que no serán probados, por lo tanto, las condiciones iniciales de cada interlock son las mismas, variando solo en la exclusión de él mismo para cada caso.

En la causa se explica la razón de la ejecución del interlock, para Extruder\_Drive. Il corresponde a una muy alta sobre carga del extrusor ( $\geq 110\%$ ) y en los efectos las repercusiones sobre los elementos finales, aclarando los módulos y canales por los cuales viajan las señales para poder corroborar el correcto funcionamiento del medio físico. Por último, las verificaciones son las indicaciones visuales y sonoras que se producen y permiten comprobar de manera sencilla que todo está en orden.

Figura 24: Construcción del certificado de pruebas IPF, parte 2.

		CERTIFICADO GENERAL DE PRUEBAS FUNCIONALES INTERLOCK'S EX2201 PPQ-PTB-IPF-			FECHA : _____			
INTERLOCK	CONDICIONES INICIALES	✓	CAUSA	✓	EFEECTO	✓	VERIFICACIONES	✓
<b>I01 CORTE POR ALTA ALTA SOBRE CARGA DEL EXTRUSOR IT-22001</b>	Forzar como normal la instrumentación asociada a los siguientes cortes:		Muy alta sobre carga del extrusor, medido en campo por el IT-22001 (NORMAL < 110%).		- Mediante la lógica de cortes configurada en el PLC, se envía un comando de salida hacia el driver del motor del extrusor por medio del módulo 3 de salidas digitales, canal 0 (O:3/0).  - Mediante la lógica de cortes configurada en el PLC, 10 minutos después de desenergizar el MEX-2201 se envía un comando de salida hacia el motor del ventilador de enfriamiento por medio del módulo 3 de salidas digitales, canal 2 (O:3/2)  - Mediante la lógica de cortes configurada en el PLC, se envía un comando de salida hacia la bomba A de aditivos por medio del módulo 3 de salidas digitales, canal 5 (O:3/5)  - Mediante la lógica de cortes configurada en el PLC, se envía un comando de salida hacia la bomba B de aditivos por medio del módulo 3 de salidas digitales, canal 6 (O:3/6)		Indicación alarma visual y sonora del paro de extrusor EX-2201 en gabinete local de operación.	
	Interlock I02 - FSL-22001. Tarjeta de entradas digitales 2/ Canal 1 (DI2/1 - ON).							
	Interlock I03 - XS-22021A. Tarjeta de entradas digitales 3/ Canal 0 (DI3/0 - ON).							
	Interlock I04 - ST-22001 (DESVIACIÓN < 5 RPM DEL SETPOINT). Tarjeta de entradas analógicas 1/ Canal 1 (AI1/1).							
	Interlock I01 - XS-22024. Tarjeta de entradas digitales 3/ Canal 7 (DI3/7 - ON).							
	Interlock I06 - ZS-22001B. Tarjeta de entradas digitales 2/ Canal 4 (DI2/4 - ON).							
	Interlock I07 - ZS-22002. Tarjeta de entradas digitales 2/ Canal 4 (DI2/5 - ON).							
	Interlock I08 - XS-22021B. Tarjeta de entradas digitales 3/ Canal 1 (DI3/1 - OFF).							
							Indicación visual en display General Polietileno I y SE2201, cambio de color de blanco a negro del MEX-2201.	

Fuente: ECOPETROL S.A.

Para el sistema de extrusión se identificaron 50 Interlock que se encuentran en el documento del anexo C como resultado del estudio realizado en la programación del PLC. Por lo tanto, las condiciones iniciales de cada uno son 49, dejando a un lado el interlock que se quiere probar.

---

## 7. CONCLUSIONES

---

- El estudio del funcionamiento del sistema de extrusión facilitó el análisis e interpretación de la programación pues esta refleja el comportamiento que tiene en el proceso de producción de polietileno.
- Con la ayuda de la documentación sobre el proceso de extrusión y la programación del PLC que controla y protege al sistema, se identificaron las funciones de protección (50) y permisivos (98), contribuyendo al análisis operacional y a la interpretación de riesgos eliminando la brecha de conocimiento que existía entre los operadores e ingenieros y el sistema de extrusión.
- Se construyó la matriz causa efecto y el certificado de pruebas funcionales IPF siguiendo los estándares manejados por ECOPETROL S.A.. La MCE respalda la disponibilidad operacional del sistema de extrusión asegurando que los operadores cuenten con la información a la mano y se puedan prevenir paradas no deseadas. Asimismo, con el certificado de pruebas funcionales IPF se asegura el correcto funcionamiento de toda la instrumentación que vela por la protección del sistema.
- La carencia de conocimiento sobre seguridad funcional de un sistema puede desembocar en imprevistos que incluso pongan en riesgo la integridad del personal operativo, por esta razón, siempre se debe garantizar que se tenga a la mano toda la información necesaria para minimizar cualquier tipo de riesgos.

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Allen-Brandley, *STUDIO 5000 LOGIX DESIGNER [en línea]*, Rockwell Software, 2018. (Recuperado en 22 de enero de 2018.) Disponible en: <https://www.rockwellautomation.com/rockwellsoftware/products/studio5000-logix-designer.pagefeatures>.
- [2] Comisión Internacional Electrotecnical, *Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector – Part 1: Framework, definitions, system, hardware and software requirements*. Internacional Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland., 1 ed., ene 2003.
- [3] Comisión Internacional Electrotecnical, *Functional Safety of electrical / electronic / programmable electronic safety-related system*. Internacional Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland., 2 ed., 2010.
- [4] De Los Santos, Jhonatan y Esperanza, Alejandro, *Seguridad funcional, Incluyendo Ciberseguridad y Administración de Alarmas*, exida.com LLC, 2013.
- [5] ECOPETROL S.A, *Manual de descripción de procesos de la unidad Polietileno I*. ECOPETROL S.A, 0 ed., 2009.
- [6] ECOPETROL S.A, *Manual de operaciones planta de Polietileno I*. ECOPETROL S.A, 2009.
- [7] ECOPETROL S.A, *Marco Estratégico [en línea]*, ecopetrol, 2014. (Recuperado en 22 de noviembre de 2017.) Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/acerca-de-ecopetrol/marco-estrategico/mision-vision>.
- [8] Jit Sen Lim, M Rashdan Mahmood, M Saleh Sidek and Hashim Abdul Fattah, *Challenges and Improvement of Instrumented Protective Function IPF Maintenance*, Society of Petroleum Engineers, 2017.
- [9] McSween Terry. E., *Values-Based Safety Process: Improving Your Safety Culture With Behavior-Based Safety*, John Wiley & Sons, 2003.

---

## **ANEXOS**

---

Por cuestiones de confidencialidad, si se desea tener acceso a los anexos, se debe consultar con el autor o director del proyecto.

**A. Entradas y salidas del sistema de extrusión**

**B. Matriz Causa Efecto**

**C. Certificado de pruebas funcionales IPF**