

Desarrollo de un aplicativo computacional para realizar cálculos de arco eléctrico según NFPA 70E en la sub-estación eléctrica de la unidad operativa POLY I de la refinería Barrancabermeja GRB.

Joaquín Erasmo Cáceres Egea.

Monografía de grado presentada como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento.

Director:

Humberto Ballestas Moreno.

MSc. Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingeniería Físico – mecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Especialización en Gerencia de Mantenimiento  
Bucaramanga  
2020.

## **Dedicatoria.**

Hoy quiero dedicarte esto a ti PAPA, lo voy a disfrutar con todos mis sentidos y mis logros como Ing. Especialista van a ser la manera de honrarte y agradecerte todo lo que me diste.

Hoy termina una etapa de mi vida como técnico con todo lo bueno y no tan bueno, y comienza una etapa llena de satisfacciones profesionales como especialista en Gerencia de Mantenimiento

A mis ancestros analfabetos los honro con este logro Universitario que por su destino difícil no pudieron leer estas palabras escritas por mí.

Ellos que solo tuvieron unas manos para trabajar, los honro

A todos aquellos que fueron rechazados y dejados de lado por no poder acceder a la educación, los honro

A los ausentes y a los presentes que hicieron lo que mejor sabían hacer mi honra toda es para ellos.

Lo que aprendí de todos ustedes me hace ser quien soy y me permite transitar el camino de mi vida con sabiduría, consciente de que cumplo mi propio proyecto de vida, libre de lealtades familiares invisibles y visibles, libre de ataduras y creencias que puedan perturbar mi Salud, Alegría, mi Paz y Felicidad.

Les Amo y les acepto en mi vida y experiencia de vida.

**GRACIAS, GRACIAS, GRACIAS.**

Con Amor, **JOAQUIN ERASMO**

### **Agradecimientos.**

El autor de este documento agradece este trabajo a Dios, todo poderoso que ha sido la luz que guía el camino de mi vida, a mi familia, mis hijos Camila, Daniel y Mia Luciana, especialmente a Helem Ballesteros mis esposas, quienes han estado acompañándome en este camino, ellos fueron fundamentales para no abandonar. El autor de este trabajo presenta sus más sinceros agradecimientos al MSc. Humberto Ballestas por sus palabras de apoyo lo cual hizo posible que este documento fuese terminado con éxito.

**JOAQUÍN.**

## Contenido

Introducción.....	13
1. Planteamiento del problema.....	14
2. Justificación.....	16
3. Objetivos.....	17
3.1. Objetivo general. ....	17
3.2. Objetivos específicos. ....	17
4. Análisis de la literatura.....	18
4.1. Marco teórico.....	18
4.1.1. Arco eléctrico.....	18
4.1.2. Elementos que conforman el arco eléctrico. ....	19
4.1.3. NFPA 70E. ....	21
4.1.4. Normativa colombiana – Resolución 1348 de 2009 -. ....	24
4.1.5. Descripción general de la refinería. ....	25
4.1.6. Unidades del departamento de Servicios Industriales. ....	28
4.2. Marco conceptual. ....	32
4.3. Marco legal.....	35
4.4. Sistemas y subsistemas de la subestación POLY I. ....	36
4.5. Datos de entrada para aplicativo computacional según Anexo D de NFPA 70E..	40
4.5.1. Fronteras de aproximación – Dato de entrada: Tensión de red.....	41

4.5.2. Casco y guantes dieléctricos – Dato de entrada: Tensión de red. ....	43
4.5.3. Categoría de traje, cortocircuito y energía incidente .....	47
5. Desarrollo de aplicativo computacional aplicado a las unidades de generación de la refinería Barrancabermeja GRB.....:	52
5.1. Ventana inicial del aplicativo computacional.....	53
5.1.1. Ventana de sistemas y subsistemas POLY I.....	54
5.2. Ventana que indica las fronteras de aproximación. ....	57
5.3. Ventana elementos de protección personal (casco y guantes). ....	58
5.4. Ventana energía incidente y cortocircuito. ....	59
5.5. Estudio de arco en transformador TRF148D POLY I.....	62
5.5.1. Fronteras de aproximación al TRF148D.....	62
5.5.2. Clasificación de casco y guantes para trabajar en TRF148D subestación POLY I.64	
5.5.3. Corriente de cortocircuito, energía incidente y traje para actividades en el transformador TRF148D de la subestación POLY I. ....	65
5.5.4. Informe de resultados para el caso del transformador TRF148D .....	68
6. Desarrollo de un manual de usuario para la operación del aplicativo computacional.....	69
6.1. Guía de inspección de la subestación POLY I. ....	72
6.1.1. Requisitos de entrenamiento.....	73
6.1.2. Prácticas de seguridad.....	73
6.1.3. Trabajos mientras se expone a peligros eléctricos.....	74
6.1.4. Uso de equipos.....	75
6.2. Reglas de oro en trabajos con electricidad.....	75

6.3. Aplicación de bloqueo y etiquetado en subestación POLY I. ....	76
6.4. Configurar y habilitar macros en Microsoft Excel. ....	77
6.5. Aspectos técnicos a tener en cuenta para la correcta manipulación del aplicativo. ....	77
6.5.1 Obtener y cargar datos de tensión de red de sistema en aplicativo computacional. ....	78
6.6. Obtener y cargar datos impedancia, distancia entre electrodos, tiempo de despeje de la falla y potencia de TRF. ....	80
7. Conclusiones. ....	82
Referencias Bibliográficas. ....	83

## Índice de tablas.

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Porcentaje de personas que se protegen según la corriente de disparo. ....	15
Tabla 2 Comparación de las Normas NFPA 70E y IEEE 1584 para la protección ante arco eléctrico. ....	21
Tabla 3 Limitaciones de los métodos de cálculo. ....	22
Tabla 4 Sistemas y subsistemas de subestación POLY I. ....	37
Tabla 5 Fronteras de aproximación según NFPA 70E. ....	41
Tabla 6 Clasificación de guantes dieléctricos EN60903 y ASTM D120. ....	44
Tabla 7 Clasificación de cascos dieléctricos según ANSI Z89.1 y NTC 1523. ....	44
Tabla 8 Características de traje de protección. ....	46
Tabla 9 Comparación entre NFPA 70E y resultados de aplicativo. ....	60
Tabla 10 Comparativa entre cálculos automáticos y manuales para casco y guantes. ....	64
Tabla 11 Comparación de resultados NFPA 70E y aplicativo. ....	66
Tabla 12 Requisitos de entrenamiento subestación POLY I. ....	73
Tabla 13 Programa de seguridad en subestación POLY I. ....	74
Tabla 14 Trabajo mientras se expone a circuitos eléctricos. ....	74
Tabla 15 Trabajo mientras se expone a circuitos eléctricos. ....	75
Tabla 16 Bloqueo y etiquetado. ....	76

## Índice de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Actividades realizadas durante electrocución.....	14
Figura 2 Arco eléctrico producido por falla en interruptor de media tensión.....	18
Figura 3 Elementos que componen el arco eléctrico. ....	20
Figura 4 Elementos que componen la explosión de arco.....	20
Figura 5 Aspectos que cubre la NFPA 70E. ....	22
Figura 6 Fronteras de aproximación contra arco eléctrico.....	23
Figura 7 Diagrama general de la Refinería de Barrancabermeja. ....	27
Figura 8 Esquema operativo unidades tratamiento de agua.....	29
Figura 9 Esquema operativo unidades generación de vapor.....	30
Figura 10 Esquema operativo unidades generación eléctrica.....	31
Figura 11 Esquema operativo unidades generación de aire.....	32
Figura 12 Normatividad legal de Ecopetrol S.A.....	35
Figura 13 Objetivos viabilidad ambiental.....	36
Figura 14 Transformador de entrada a la subestación POLY I.....	37
Figura 15 Diagrama unifilar subestación POLY I. ....	39
Figura 16 Transformadores subestación POLY I.....	40
Figura 17 Algoritmo para determinar fronteras de aproximación.....	42
Figura 18 Algoritmo para realizar clasificación de guantes.....	45
Figura 19 Algoritmo para realizar clasificación de cascos.....	47
Figura 20 Algoritmo para determinar traje de protección.....	48

Figura 21 Algoritmo para calcular energía incidente.....	52
Figura 22 Funciones del aplicativo computacional.....	53
Figura 23 Ventana inicial del aplicativo computacional.....	54
Figura 24 Ventana de sistemas y subsistemas de la subestación POLY I. ....	55
Figura 25 Informe de diagrama unifilar subestación POLY I.....	56
Figura 26 Ventana que indica las fronteras de aproximación. ....	57
Figura 27 Ventana para determinar categoría de casco y guantes. ....	59
Figura 28 Ventana energía incidente, categoría de traje y corto circuito.....	59
Figura 29 Datos entregados en el informe de estudio de arco eléctrico.....	61
Figura 30 TRF 148D en diagrama unifilar.....	62
Figura 31 Fronteras de aproximación para TRF148D .....	63
Figura 32 Calcificación de guantes y casco para trabajar en TRF148D .....	65
Figura 33 Resultados de arco eléctrico para TRF148D subestación POLY I.....	66
Figura 34 Traje Arc Flash .....	65
Figura 35 Comparación de resultados entre aplicativo y norma.....	66
Figura 36 Resultados del estudio para el transformador TRF.....	67
Figura 37 Acciones para garantizar condiciones de trabajo seguro.....	70
Figura 38 Reglas de oro en trabajos con electricidad.....	73
Figura 39 Habilitar macros.....	74
Figura 40 Datos de tensión de red.....	76
Figura 41 Frontera limitada en subestación POLY I. ....	79
Figura 42 Información de curvas de disparo.....	80

Figura 43 Distancia entre electrodos de un TRF.....81

## Resumen

**Título:** Desarrollo de un aplicativo computacional para realizar cálculos de arco eléctrico según NFPA 70e en la subestación eléctrica de la unidad operativa POLY I de la refinería Barrancabermeja GRB\*

**Autor:** Joaquín Erasmo Cáceres Egea\*\*

**Palabras claves:** NFPA 70E, riesgo, peligro, energía incidente, transformador.

### Descripción:

Los accidentes laborales por electrocución ocupan un alto índice en Colombia, Las lesiones causadas por este tipo de accidente generalmente son fatales. Es por esto que se debe determinar medidas de control y equipos de protección personal que son necesarios para atenuar la energía incidente de un arco eléctrico sobre la piel lo que eliminara la probabilidad de quemaduras de segundo y tercer grado. A lo largo de este documento se presentan los pasos que permiten llevar al desarrollo de un aplicativo computacional que permite realizar un estudio de arco en la subestación POLY I de la refinería Barrancabermeja. Por esta razón se inicia con la identificación y análisis de los sistemas y subsistemas que componen dicha subestación. Después de esto se entra a crear una serie de ventanas que fueron divididas en fronteras de aproximación, elementos de protección personal y energía incidente. Finalmente, se crea un manual que permite una mejor comprensión de la utilidad del aplicativo. En el manual de usuario cuenta con guías para realizar inspección según lo establece la NFPA 70E, reglas de oro en trabajos con electricidad, condiciones para bloqueo y etiquetado y algunos aspectos técnicos a tener en cuenta para el registro de datos.

---

\* Desarrollo de un aplicativo computacional para realizar cálculos de arco eléctrico según NFPA 70E en la sub-estación eléctrica de la unidad operativa POLY I de la refinería Barrancabermeja GRB.

\*\* Facultad de Ingeniería Físico – mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Humberto Ballestas Moreno. MSc. Ingeniero Mecánico

## Summary

**Title:** Development of a computational application to perform arc calculations according to NFPA 70e in the electrical substation of the POLY I operating unit of the Barrancabermeja GRB refinery\*.

**Author:** Joaquín Erasmo Cáceres Egea\*\*

**Keywords:** NFPA 70E, risk, hazard, incident energy, transformer.

### Description:

Electrocution accidents at work occupy a high rate in Colombia. Injuries caused by this type of accident are generally fatal. For this reason, control measures and personal protective equipment that are necessary to attenuate the incident energy of an electric arc on the skin must be determined, which will eliminate the probability of second and third degree burns. Throughout this document, the steps that lead to the development of a computational application are presented that allow an arc study to be carried out at the POLY I substation of the Barrancabermeja refinery. For this reason, it begins with the identification and analysis of the systems and subsystems that make up said substation. After this, a series of windows was created that were divided into approach borders, personal protection elements and incident energy. Finally, a manual is created that allows a better understanding of the utility of the application. In the user manual there are guides to carry out inspection as established by NFPA 70E, golden rules in electrical work, conditions for blocking and tagging and some technical aspects to take into account for data registration.

---

\* Development of a computational application to perform arc calculations according to NFPA 70e in the electrical substation of the POLY I operating unit of the Barrancabermeja GRB refinery

\*\* Facultad de Ingeniería Físico – mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Humberto Ballestas Moreno. MSc. Ingeniero Mecánico.

## **Introducción.**

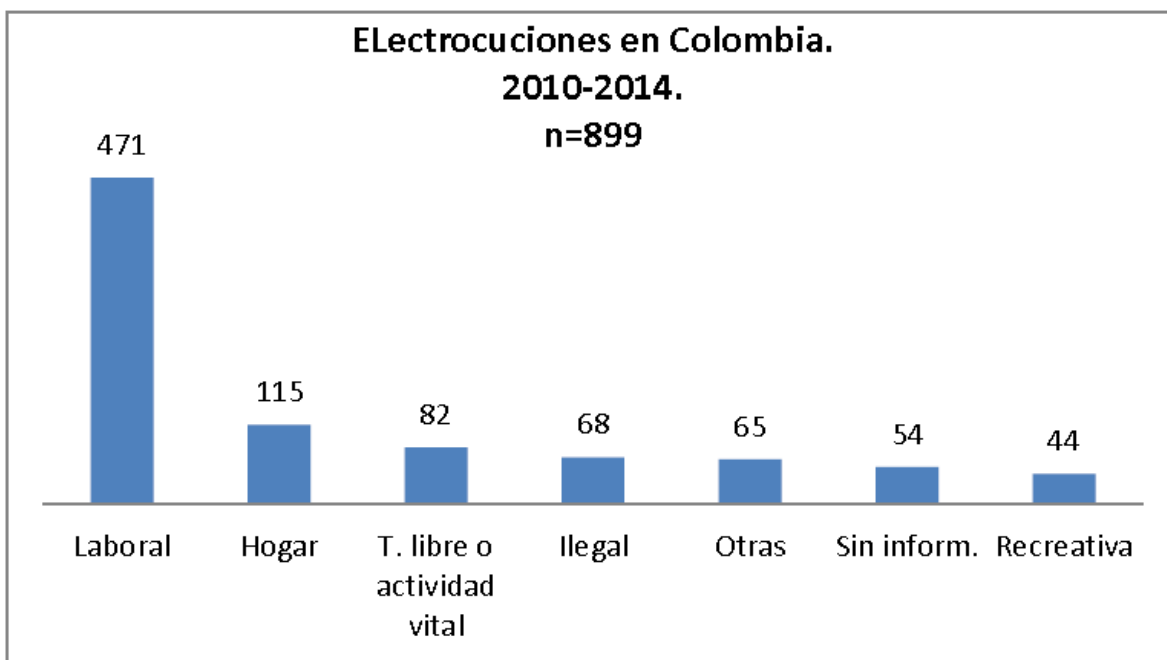
Este documento presenta el desarrollo de un aplicativo computacional que permita realizar un estudio de arco eléctrico en la subestación POLY I, esto basado en la NFPA 70 E que es una norma para la seguridad eléctrica en áreas de trabajo, dado el gran número de accidentes de trabajo en los cuales se ve involucrado el riesgo eléctrico. Por esta razón se planteó como pregunta de investigación ¿Cómo aportar a este compromiso con la vida para el desarrollo de actividades que involucren riesgo eléctrico en la SUB-ESTACIÓN de la unidad operativa POLY I?, lo cual llevo a plantear como objetivo general: desarrollar un aplicativo computacional para realizar cálculos de arco eléctrico según NFPA 70E en la SUB-ESTACIÓN eléctrica de la unidad operativa POLY I de la Refinería Barrancabermeja GRB.

### 1. Planteamiento del problema.

Según el estudio desarrollado por (Valbuena, 2016), en Colombia el 52,4% de las personas que tuvieron un accidente laboral fue por causa de la energía eléctrica ver **figura 1**, con una edad promedio de 36 años y el 99,6% eran hombres.

**Figura 1.**

*Actividades realizadas durante electrocución*



**Nota:** Se describe el total de la accidentalidad en Colombia por electrocución (Valbuena, 2016)

Ahora bien, la electrocución hace referencia a las lesiones provocadas por el paso de corriente eléctrica a través de un organismo. De acuerdo a lo indicado en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas el porcentaje de personas que no se ven afectadas por el paso de la corriente está indicado en la **tabla 1**, sin embargo, una corriente mayor a 30 mA ocasionaría la muerte tanto en hombres, mujeres y niños por fibrilación ventricular. Adicional a esto la

dependencia industrial y en el hogar por el uso de equipos y electrodomésticos que operan gracias a la energía eléctrica ha ocasionado el aumento de accidentes por contactos directos e indirectos; para el caso de un accidente laboral esto puede traer consigo una serie de inconvenientes adicionales que serán responsabilidad civil, penal, administrativa y laboral y recaerán ante la empresa o representante legal.

**Tabla 1.**

*Porcentaje de personas que se protegen según la corriente de disparo*

Corriente de disparo	6mA	10mA	20mA	30mA
Hombres	100%	98.5%	7.5%	0%
Mujeres	99.5%	60%	0%	0%
Niños	92.5%	7.5%	0%	0%

**Nota:** Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, RETIE, p. 48.

En los años 80 el ingeniero Ralph Lee establece un nuevo concepto por peligros relacionados con accidentes por efectos de arco eléctrico, el cual ocasiona lesiones como quemaduras (Cadik, 2006). En ocasiones ese peligro no se relaciona ni cuantifica lo que trae consigo que no sea posible establecer medidas de prevención que minimicen el efecto ante la exposición a un arco eléctrico. Por esta razón la norma NFPA 70E establece categorías y medidas de riesgo de los sistemas eléctricos. Entonces Ecopetrol en su compromiso con la vida busca garantizar un entorno sano, seguro y limpio en las actividades diarias, por esta razón plantea la hipótesis ¿Cómo aportar a este compromiso con la vida en el desarrollo de actividades que involucren riesgo eléctrico en la SUB-ESTACIÓN de la unidad operativa POLY I?

## **2. Justificación.**

Las Unidades de Generación de Eléctrica de la GRB están compuestas por una serie de turbogeneradores que funcionan con el vapor de 400 psi y tienen la capacidad de generar hasta 30MW. La ausencia de trabajos de investigación del arco eléctrico en las unidades de generación de la GRB justifica la realización de este estudio, ya que a través de él se puede aportar no solo a la política del compromiso con la vida, ya que también puede contribuir a aportar a las políticas de intercesión en materia de salud ocupacional como se describe en la resolución 1348 de 2009. Este trabajo servirá para determinar medidas de control y equipos de protección personal que son necesarios para atenuar la energía incidente de un arco eléctrico sobre la piel lo que eliminara la probabilidad de quemaduras de segundo y tercer grado.

### **3. Objetivos.**

#### **3.1. Objetivo general.**

Desarrollar un aplicativo computacional para realizar cálculos de arco eléctrico según NFPA 70E en la SUB-ESTACIÓN eléctrica de la unidad operativa POLY I de la Refinería Barrancabermeja GRB.

#### **3.2. Objetivos específicos.**

- Identificar los sistemas y subsistemas que componen las Unidades de Generación Eléctrica, para establecer la información de entrada del aplicativo computacional, que permite determinar la categoría del traje, clase de guantes y casco dieléctricos, límite de aproximación seguro, restringido, de aproximación por arco, energía incidente y cortocircuito, utilizando la NFPA 70E y macros de Excel.
- Implementar el aplicativo computacional, que permita realizar cálculos de arco eléctrico en las Unidades de Generación eléctrica de la refinería Barrancabermeja, mediante el uso de plantillas de cálculo.
- Elaborar un manual de usuario, que sirva de guía para la operación del aplicativo computacional utilizado para realizar estudios de arco eléctrico.

## 4. Análisis de la literatura

### 4.1. Marco teórico.

#### 4.1.1. Arco eléctrico.

El arco eléctrico es el proceso en el cual circula una corriente eléctrica muy elevada, lo que trae consigo la ionización del medio que se encuentra entre dos superficies de diferente potencial (Yupanqui, 2018). Una manifestación de este fenómeno es el indicado en la **figura 2** aquí se observa un incidente presentado durante la manipulación de un interruptor de media tensión en la refinería Barrancabermeja.

#### Figura 2.

*Arco electro producido por falla en interruptor de media tensión*



**Nota:** Descripción grafica de un arco electrico producido por una falla en el interruptor de medio de tensión

Las manifestaciones del arco eléctrico permanecerán presentes hasta que se proporcione energía suficiente para compensar la cantidad de calor disipado y mantener las condiciones adecuadas de temperatura. Los resultados de un arco eléctrico se caracterizan por la intensa ionización del medio gaseoso, por reducidas caídas de tensión anódica y catódica, por altas o muy altas densidades de corriente que generan temperaturas de miles de grados centígrados. Ahora bien, la IEEE 1584 indica que el riesgo asociado al arco eléctrico es una condición peligrosa asociada con a la liberación de energía causada por el mismo (Mohamed A, 2002). Este fenómeno no es lineal y fuertemente dependiente de las condiciones iniciales como:

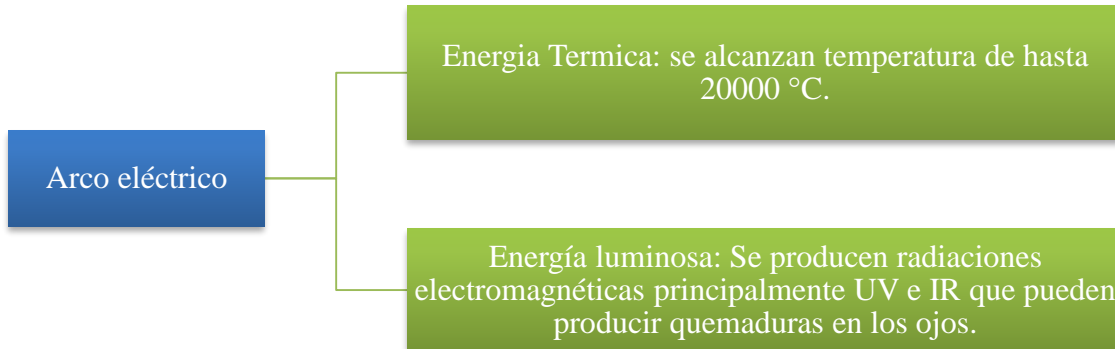
- Número de veces que los trabajadores se encuentran expuestos a equipos energizados.
- Complejidad de la tarea a realizar.
- Entrenamiento, capacitación, agilidad física y mental.
- Herramientas y EPP adecuados.

#### **4.1.2. Elementos que conforman el arco eléctrico.**

En la **figura 3**, que es un diagrama de flujo, se indican cuáles son los elementos que conforman el arco eléctrico, el cual se puede definir como la liberación de energía térmica y luminosa (Christopher D. Coache & Gil Moniz, 2015).

**Figura 3**

*Elementos que componen el arco eléctrico.*

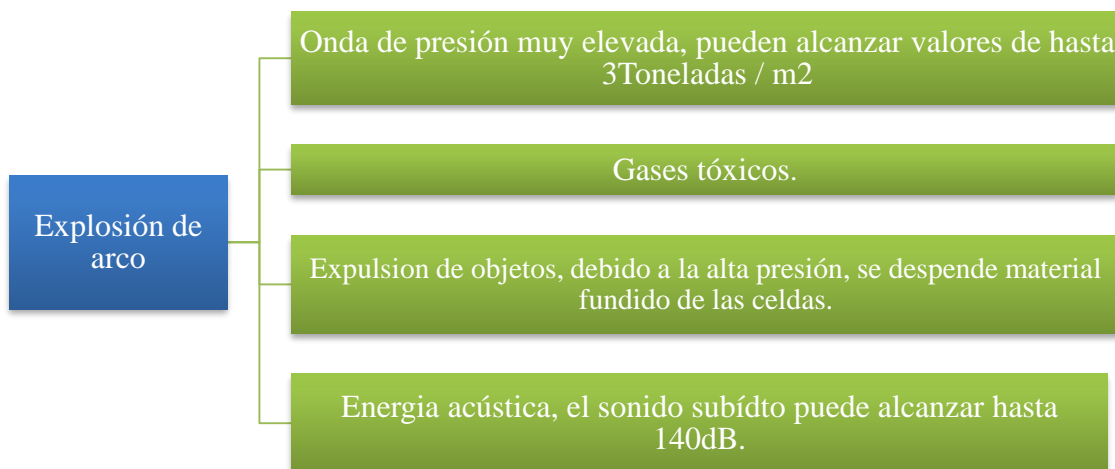


**Nota:** Neitzel, D. Handbook for Electrical Safety in the Workplace. Tercera Edición. Editorial MacGraw Hill, 2006, p24-26.

La explosión de arco esta conformado por los elementos indicados en la **figura 4**, en esta ocasión se produce la liberación de energía en forma de onda explosiva, generada por las altas temperaturas ocasionadas por el arco eléctrico (Christopher D. Coache & Gil Moniz, 2015).

**Figura 4**

*Explosión de arco.*



**Nota:** Elementos que componen la explosión de arco. Neitzel, D. Handbook for Electrical Safety in the Workplace. Tercera Edición. Editorial MacGraw Hill, 2006, p24-26.

#### 4.1.3. NFPA 70E.

La investigación desarrollada por (Trejo, 2013) tiene como objetivo comparar la norma NFPA 70E con la IEEE 1584 para determinar la energía incidente en un sistema eléctrico e identificar e equipo de protección personal, en la **tabla 2** se presenta dicha comparación teniendo en cuenta requisitos, la norma NFPA 70E – IEEE 1584 y voltaje de red eléctrica.

**Tabla 2.**

*Comparación de las Normas NFPA 70E y IEEE 1584 para la protección ante arco eléctrico*

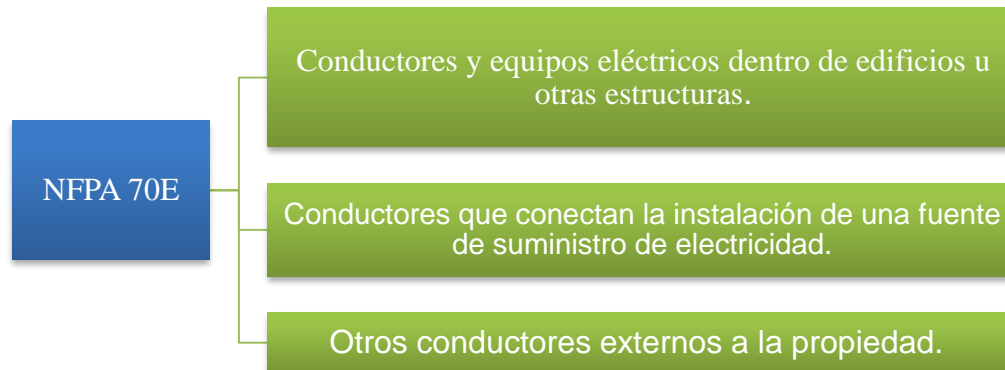
Característica	NFPA 70E	IEEE 1584
Requisitos	Realizar un análisis por flameo	Ninguna
Especificaciones	Prácticas generales de seguridad.	Métodos para realizar cálculos de riesgo eléctrico de flameo.
Voltaje	208 – 15kV usar método empírico o teórico.	208 – 15kV usar método empírico o teórico.
	Superior a 15kV usar método teórico.	Superior a 15kV usar método teórico.

**Nota:** Trejo, José (2013) *Comparación de la Norma NFPA 70E y la IEEE 1584 – 2002 para el análisis del arco eléctrico para el uso adecuado del equipo de protección*. Tesis para optar el título de Ingeniero Electricista. Instituto Politécnico Nacional, México.

Esta norma fue aprobada en el año 1999 y adoptada por el gobierno Colombiano, con el propósito de proveer un lugar seguro para los trabajadores, y cubre los aspectos indicados en la

**Figura 5**

*Aspectos que cubre la NFPA 70E.*



**Nota:** Aspectos que cubre la NFPA 70E. Llanera M. Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo. Edición 2009. Editorial OBERON. 35p.

El anexo D de la NFPA 70E resume los métodos de cálculo disponibles para calcular la energía incidente y la frontera de aproximación por relámpago de arco en la **tabla 3** se puede apreciar esta información y adicionalmente las limitaciones de cada uno de los métodos.

**Tabla 3.**

*Anexo D de la NFPA 70E*

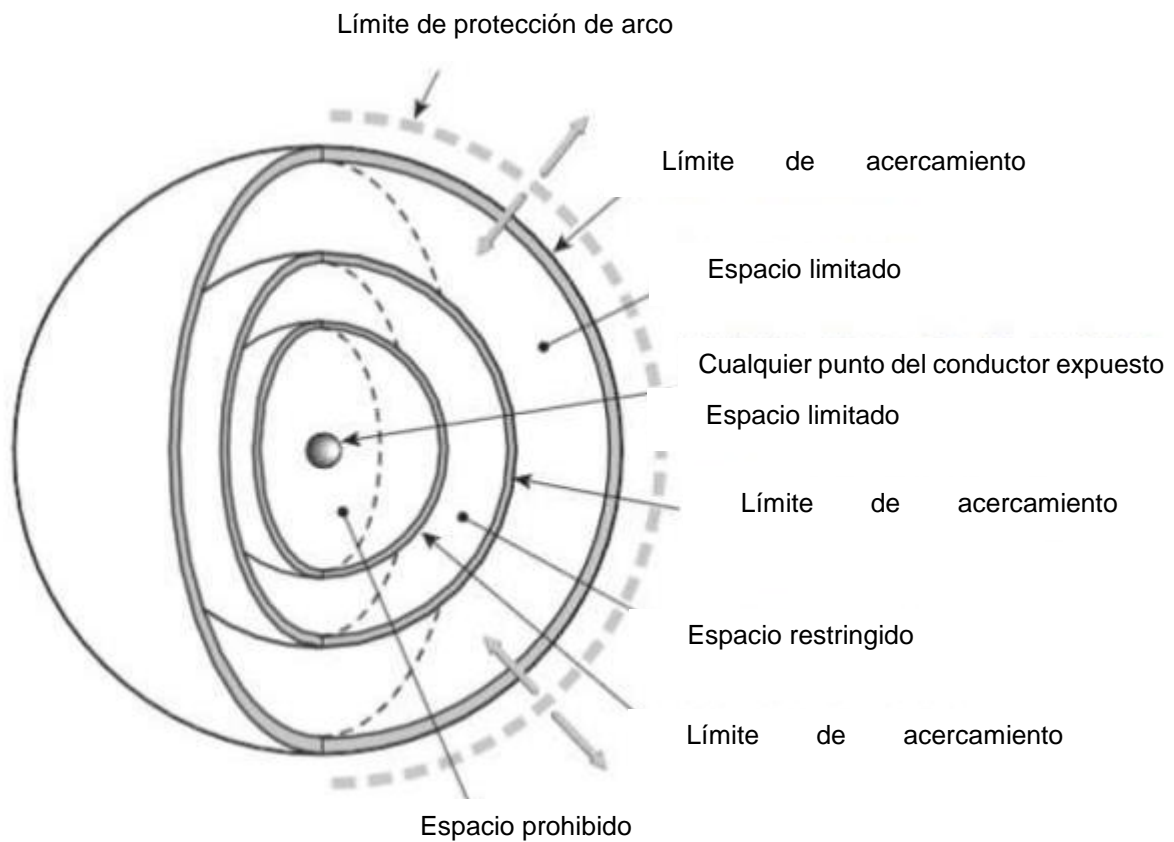
Sección.	Fuente	Limitaciones.
D2, 3 y 4.	Ralph Lee	Calcula la frontera de protección al relámpago de arco abierto al aire libre, conservador sobre los 600V y se hace más conservador a aumentar el voltaje.
D5	Doughty/Neal	Calcula la energía incidente para sistemas trifásicos de 600V, aplica a corrientes de cortocircuito de 16kA a 50kA.
D7	IEEE 1584	Calcula la energía incidente y la frontera de protección al relámpago de arco para sistemas trifásicos de 208V a 15kV y corrientes de cortocircuito de 0.7kA a 106kA.
D8	IEEE C2.	Calcula la energía incidente para arcos de fase a tierra al aire libre desde 1kV a 500kV para trabajos en línea viva.

**Nota:** Limitaciones de los métodos de cálculo. Llanera M. Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de trabajo. Edición 2009. Editorial OBERON. 35p.

Adicionalmente, esta norma establece una serie de zonas o fronteras de protección ver **figura 5** relativas a la seguridad eléctrica. La frontera de protección contra arco está definida como a distancia mínima hasta el punto donde a energía incidente en caso de presentarse una falla de arco eléctrico se alcanzaría un valor de  $5\text{J}/\text{cm}^2$ , energía suficiente para producir quemaduras de segundo grado.

**Figura 6**

*Fronteras de aproximación contra arco eléctrico.*



**Nota:** Zonas y fronteras relativas a la seguridad eléctrica. Llanera M. Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo. Edición 2009. Editorial OBERON. 35p.

#### **4.1.4. Normativa colombiana – Resolución 1348 de 2009 -.**

De acuerdo a lo citado en el artículo 1 de esta resolución el objetivo es “adoptar el Reglamento de Salud Ocupacional en los Procesos de Generación, Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica contenido en el anexo técnico que forma parte integral de la presente resolución”. De esta resolución es importante resaltar que en el artículo 11 establece las distancias de seguridad de las partes energizadas, esto es importante para este trabajo ya que pretende determinar o calcular las fronteras de aproximación de acuerdo a lo establecido en la NFPA 70E. Al trabajar cerca de partes energizadas se deben cumplir los siguientes requisitos:

- Antes de iniciar trabajos, verificar si la instalación o equipo está energizado y el nivel de tensión.
- Toda línea o equipo eléctrico se considerará energizado mientras no haya sido conectado a tierra y en cortocircuito, guardándose las distancias de seguridad correspondientes.
- Todas las partes metálicas no aterrizadas de equipos o dispositivos eléctricos, se consideran como energizadas al nivel de tensión más alto de la instalación.
- Al conectar equipotencialmente líneas o equipos se mantendrán las distancias de seguridad, mientras dichas líneas o equipos no hayan sido efectivamente aterrizadas. Estas distancias se mantendrán también respecto a los conectores y conductores de los propios equipos de puesta a tierra, por lo cual se instalarán con pértiga aislante y guantes aislados según el nivel de tensión.

- Deben mantenerse las distancias de seguridad entre las partes energizadas y los objetos que son o contienen materiales considerados conductores de la electricidad (herramientas metálicas, cables, alambres), que los trabajadores manipulen.
- Cuando se instalen o remuevan postes en la cercanía de líneas o equipos energizados estos se considerarán energizados al voltaje de operación de la línea o equipos, por tal motivo se aplicarán los procedimientos de línea viva (trabajos en tensión).
- Para el cumplimiento de las distancias mínimas de seguridad, se considerarán no solamente los actos voluntarios de los trabajadores, sino los posibles actos involuntarios o accidentales como: resbalones, pérdida del equilibrio, caídas al mismo o diferente nivel, olvido o descuido momentáneo, extensión inconsciente de los brazos, piernas, entre otros.
- Cuando se trabaje en líneas o redes cercanas a circuitos energizados (que se cruzan o son paralelos) y no se garanticen las distancias mínimas establecidas, se debe suspender el servicio en el circuito mencionado y se instalará el equipo de puesta a tierra.

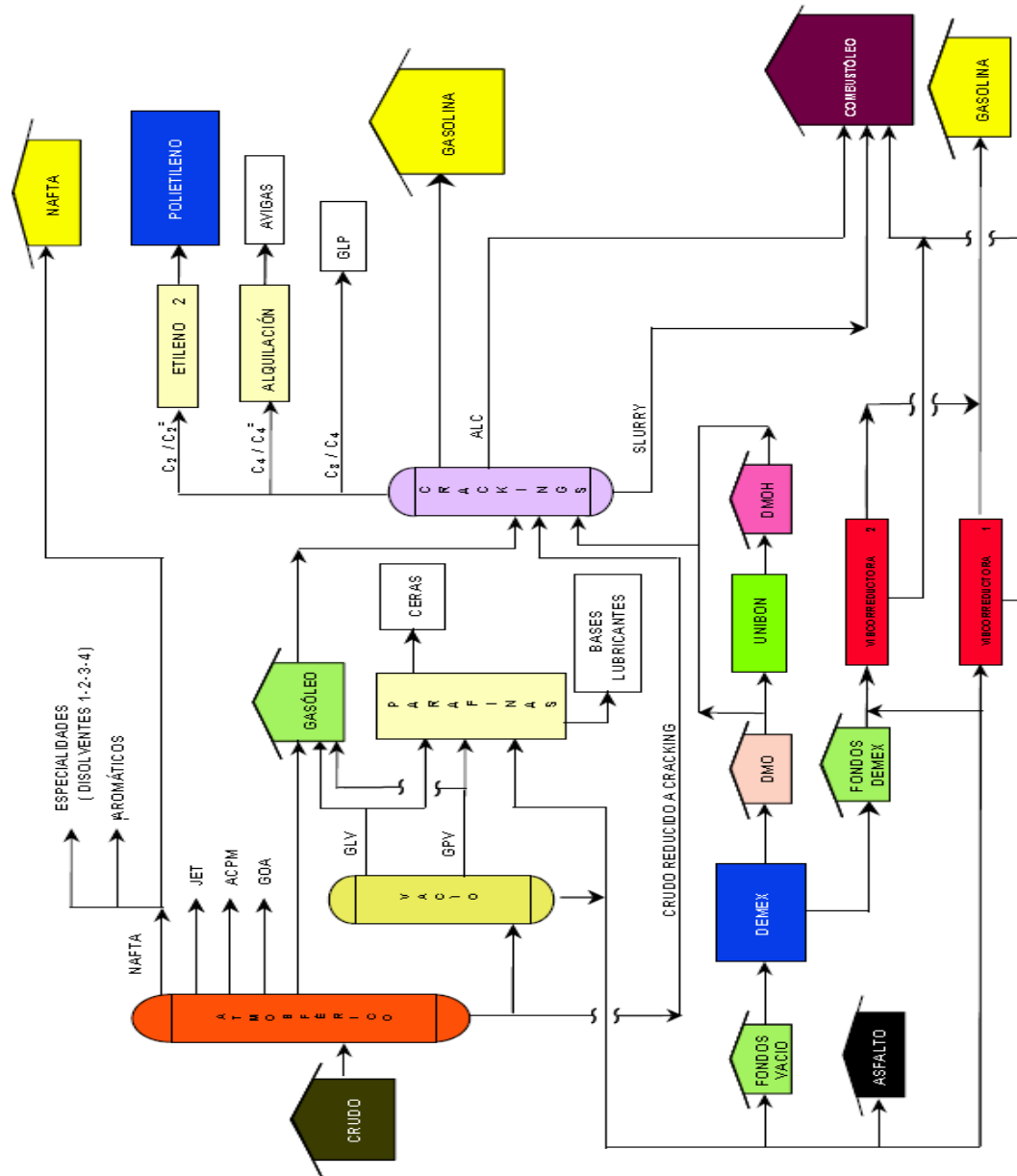
#### **4.1.5. Descripción general de la refinería.**

El 18 de febrero de 1922 se inicia la historia de la refinería de Barrancabermeja con la llegada de los primeros equipos procedentes Talara, Perú. El alambique diseñado para destilar crudo, fue instalado cerca de la entrada principal de la refinería, exactamente en donde hoy se encuentran las oficinas de la Gerencia General. Los primeros procesos se realizaron con leña y su capacidad máxima alcanzaba una destilación sólo de 1.500 Barriles diarios. El complejo procesa crudos de varias calidades para producir diferentes tipos de productos requeridos por el mercado nacional. El área de refinación produce principalmente gasolinas y destilados. El área de petroquímica elabora productos petroquímicos tales como: bases lubricantes, parafinas, aromáticos y

polietilenos. En el área de cracking se cargan gasóleos principalmente para producir GLP y nafta por medio del rompimiento de moléculas de hidrocarburos grandes. Los productos terminados y el recibo de crudos se realizan en el área de materias primas. Los servicios industriales son generados en la refinería con recurso propio. Las principales plantas de la Refinería son las que se presentan en la **figura 6** y se mencionan a continuación, TOPPING, DEMEX, UNIBON, Viscosreductora, Cracking Catalítico, Alquilación, TURBOEXPANDER, Etileno, Polietileno I y II, Nitrógeno, Parafinas, Aromáticos, Servicios Industriales.

Figura 7

Diagrama general de la Refinería de Barrancabermeja.



**Nota:** Las principales plantas de la Refinería TOPPING, DEMEX, UNIBON, Viscorreductora, Cracking Catalítico, Alquilación, TURBOEXPANDER, Etileno, Polietileno I y II, Nitrógeno, Parafinas, Aromáticos, Servicios Industriales.

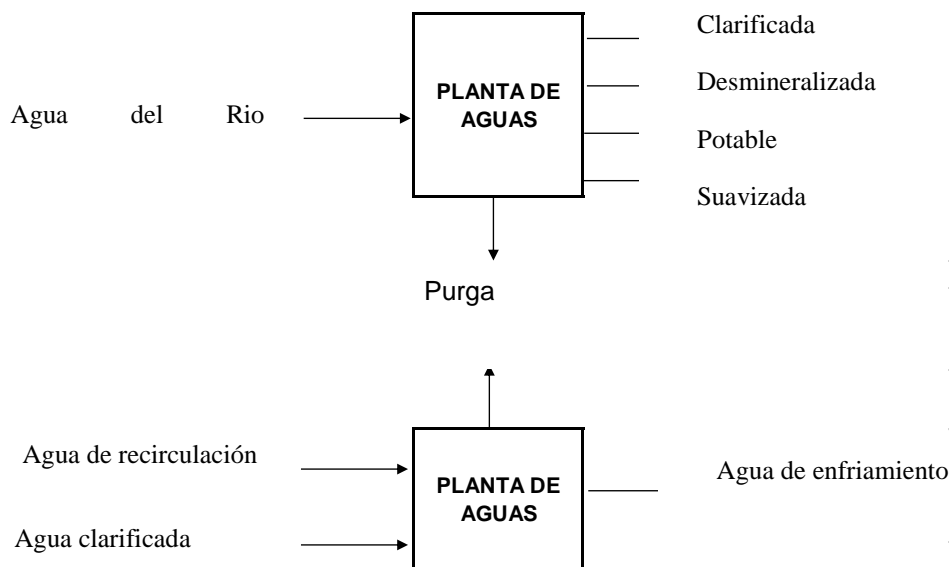
#### 4.1.6. Unidades del departamento de Servicios Industriales.

A continuación se describen cada una de las etapas de la unidad de servicios industriales de la Refinería Barrancabermeja.

**Unidades de tratamiento de agua:** El agua se capta del Río Magdalena por medio de dos bombas verticales las cuales están instaladas dentro de un bote (bote del río), en la **figura 7** se observa este proceso. Posteriormente el agua cruda es enviada hacia dos clarificadores que se encargan de remover la turbiedad de esta a través de los procesos fisicoquímicos de coagulación, floculación y sedimentación. El agua producida en los clarificadores se divide en dos flujos: el primer flujo se envía hacia el sistema de agua industrial y el otro flujo hacia el sistema de agua desmineralizada. La corriente que proviene de los clarificadores es succionada por dos bombas centrífugas y direccionada hacia los filtros de arena cuyo objetivo es atrapar los sólidos remanentes que no se precipitaron en el proceso de clarificación. Después el agua proveniente de los filtros de arena pasa a través unos intercambiadores catiónicos a fin de retirar los cationes presentes en el agua. A continuación se envía a las torres descarbonatadoras donde se elimina el CO<sub>2</sub> contenido en el agua. Posteriormente, el agua pasa por las zeolitas para eliminar los aniones presentes. Una parte del agua desmineralizada es enviada como alimentación a las unidades de generación de vapor y de procesos y otra es almacenada en dos tanques para ser suministrada a los usuarios de la unidad o de la refinería. (Maldonado, 2013)

**Figura 8**

*Unidades tratamiento de agua.*



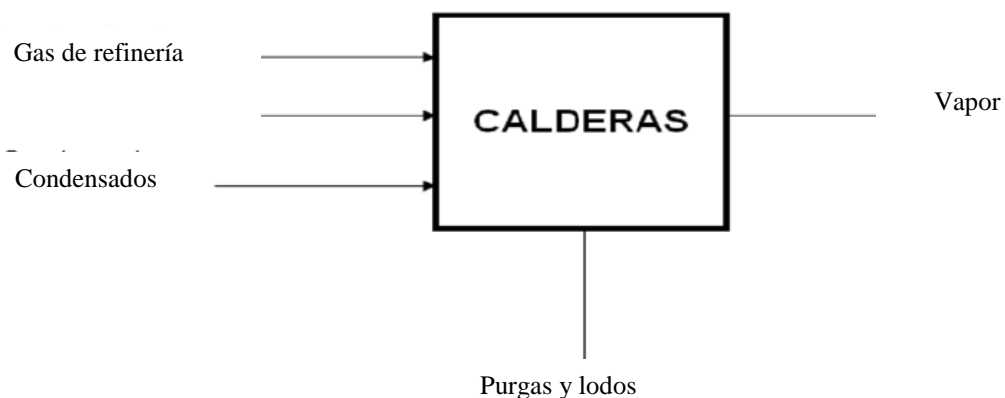
**Nota:** Esquema operativo unidades tratamiento de agua.

**Unidades de generación de vapor:** La mezcla de agua desmineralizada y suavizada proveniente de las plantas de agua y los condensados que se recuperan de las unidades de proceso de la refinería se envía como alimentación al desaireador ver **figura 8**. El proceso de desaireación se lleva a cabo al colocar en contacto una corriente de mezcla de agua desmineralizada o suavizada y condensado en contracorriente con vapor de 25 psi en el reactor del desaireador. El tratamiento químico en el desaireador se lleva a cabo mediante la adición de un secuestrante de oxígeno que remueve las trazas de oxígeno. Además, al agua tratada en el desaireador se le adicionan otros químicos, luego es succionada e impulsada por medio de las bombas de agua de alimentación hacia las calderas. El agua de alimentación de calderas es precalentada en los intercambiadores de calor

este aumento de temperatura ayuda a mejorar la eficiencia del equipo. El agua desaireada entra en la caldera al tambor de vapor e inicia una circulación natural por diferencias de densidades en donde el agua en el tambor de vapor pasa a los tambores de lodos a través de una tubería (tubos bajantes o tubos de agua) que los conecta. De los tambores de lodos salen las tuberías laterales a partir de las cuales se conforman las paredes laterales del hogar de la caldera. El vapor producido pasa a través de paneles secadores ubicados en la parte superior del interior del tambor de vapor para obtener un vapor saturado. Finalmente, el vapor pasa por los tubos del supercalentador a fin de aumentar su temperatura al aprovechar la energía de los gases de combustión en la zona de convección de la caldera. El vapor seco sobrecalentado sale de la caldera hacia el cabezal de vapor de 400 psi. (Maldonado, 2013).

**Figura 9**

*Unidades generación de vapor*

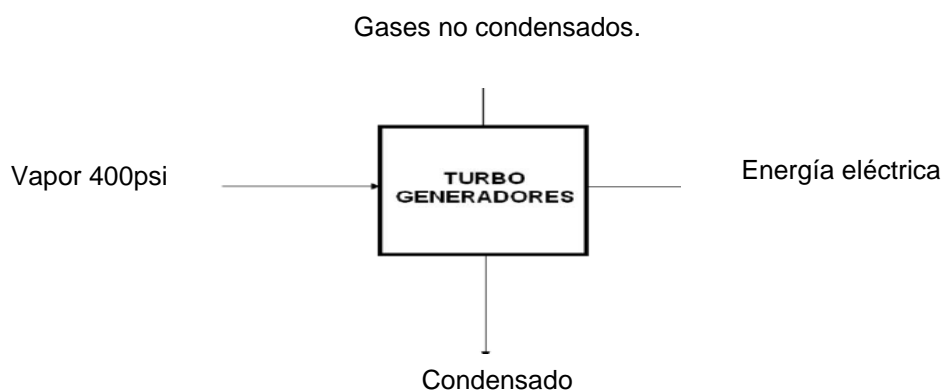


**Nota:** Esquema operativo unidades generación de vapor

**Unidades de generación de eléctrica.** La energía eléctrica se genera mediante la operación de los Turbogeneradores ver **figura 9**. Se conoce como turbogenerador al conjunto de turbina-generador conectados mediante un acople rígido. El vapor de 400 psi que proviene del cabezal de alta presión alimenta los turbogeneradores. Estas turbinas son de condensación total y están asociadas a un condensador de superficie que recoge el vapor exhausto que ya realizó el trabajo al interior de la turbina y es condensado en un intercambiador de calor con agua de enfriamiento.

**Figura 10.**

*Unidades generación eléctrica*



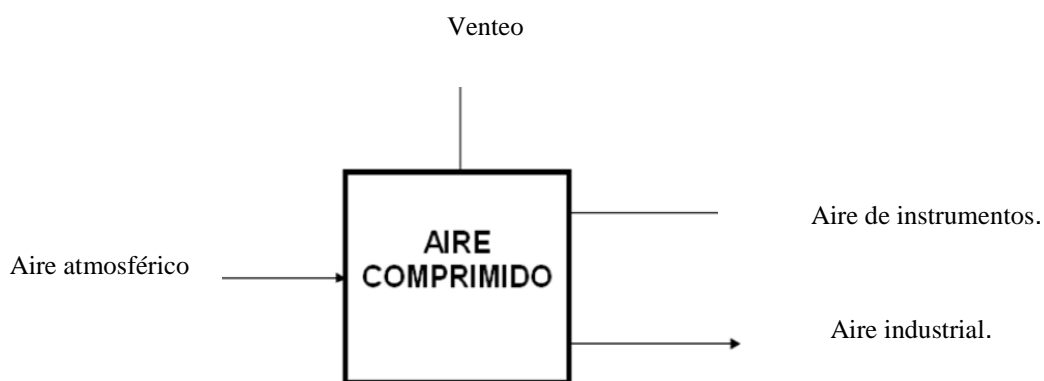
**Nota:** Esquema operativo unidades generación eléctrica

**Unidades de comprimido:** El aire se toma de la atmosfera y se comprime en tres etapas en los compresores centrífugos ver **figura 10**. Cada una de las etapas esta provista de un enfriador para retirar el calor que se genera durante la compresión del aire. Una vez enfriado, el aire pasa por un proceso de absorción de humedad el cual es llevado a cabo en los secadores de aire. En este paso se retira la humedad al aire colocándolo en contacto con esferas de alúmina como lechos

deseccantes que, a través de procesos físicos o ciclos de regeneración, continúan manteniendo su efectividad, dando como resultado un aire totalmente seco.

**Figura 11.**

*Unidades generación de aire.*



**Nota.** Esquema operativo unidades generación de aire

#### 4.2. Marco conceptual.

A continuación, se definen algunos términos y actividades que deben ser claros para mejorar la comprensión de este documento.

**Aislado:** Separado de otras superficies conductoras por medio de un dieléctrico (incluyendo el espacio de aire) que ofrece alta resistencia al paso de corriente.

**Actividad Intrusiva:** Son acciones realizadas en las fases de instalación, operación y/o mantenimiento, que para ejecutarlas requieren intervenir la integridad del diseño de las instalaciones, planta y/o equipos, con la posibilidad de liberar la energía presente, que pueda materializar riesgos asociados al activo y exige la aplicación del sistema de seguro de plantas y equipos antes de proceder con su ejecución. La misma acción de instalación y retiro del aislamiento se considera actividad intrusiva.

**Ampacidad:** Corriente, en amperios, que un conductor puede transportar continuamente en condiciones de uso sin superar su temperatura nominal.

**Arco nominal:** El valor atribuido a materiales que describe su desempeño al exponerse a la descarga de un arco eléctrico.

**Consecuencias:** Evento o cadena de eventos con efectos reales o hipotéticos, inmediatos o no, sobre las personas, la economía, el ambiente y la imagen, que puede producirse a raíz de la liberación de un peligro y dentro de una situación hipotética creíble.

**Controles:** Son los controles pro-activos que se deben implementar para evitar que se den las causas de liberación de los peligros, como, por ejemplo: emplear personal competente, usar las herramientas adecuadas, etc.

**Especificación Técnica:** Documento que establece características técnicas de un producto o servicio.

**Electrocución:** Paso de corriente eléctrica a través de un cuerpo vivo.

**Energía incidente:** La cantidad de energía impuesta sobre una superficie a una cierta distancia de la fuente generada durante el evento de arco eléctrico. Una de las unidades más utilizadas para medir la energía incidente es calorías por centímetro cuadrado.

**Energizado:** Conectado eléctricamente a, o es, una fuente de tensión.

**Impericia:** Falta de habilidad para desarrollar una tarea.

**Mantenimiento:** Conjunto de acciones o procedimientos tendientes a preservar o restablecer un bien, a un estado tal que le permita operar en forma confiable y segura.

**Señalización:** Conjunto de actuaciones y medios dispuestos para reflejar las advertencias de seguridad en una instalación.

**Persona Calificada:** Persona natural que demuestre su formación profesional en el conocimiento de la electrotecnia y los riesgos asociados con la electricidad, y que además cuente con matrícula profesional, certificado de inscripción profesional, o certificado de matrícula profesional, que, según la normatividad legal vigente, lo autorice o acredite para el ejercicio de la profesión, de acuerdo con el artículo 3 del RETIE.

**Peligro:** Es una fuente, elemento, condición o situación que tiene el potencial de causar daño a las personas (lesión o enfermedad), la economía, equipos, el medio ambiente o la imagen.

**Peligro eléctrico:** Una condición peligrosa tal que el contacto o la falla de equipos puede resultar en: un choque eléctrico, quemaduras de relámpago de arco, quemaduras térmicas.

**Riesgo:** Es un concepto que surge de la exposición a un peligro. Sin exposición al peligro no hay riesgo.

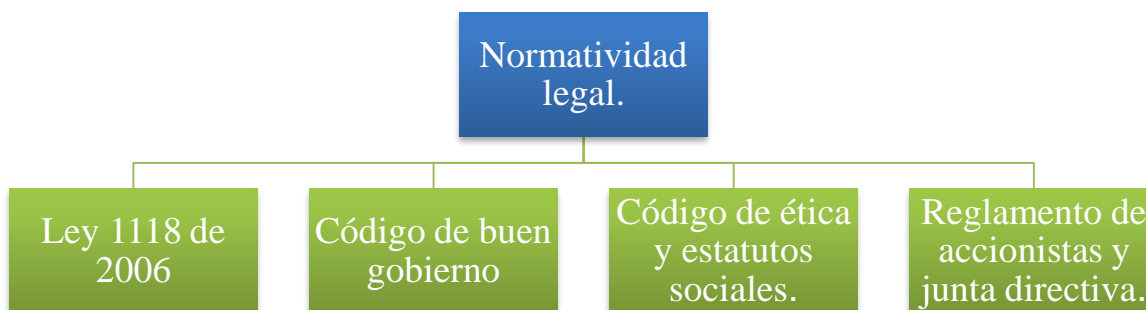
**Responsables:** Es la persona responsable de ejecutar el control establecido.

#### 4.3. Marco legal.

Según lo indica la ley 1118 de 2006 Ecopetrol S.A es una sociedad mixta que se encuentra vinculada al Ministerios de Minas y Energía, y es regida por los estatutos sociales de escritura pública N°5314. EN la **figura 11** se indica la normatividad vigente para la empresa.

#### Figura 12

*Normatividad legal de Ecopetrol S.A.*

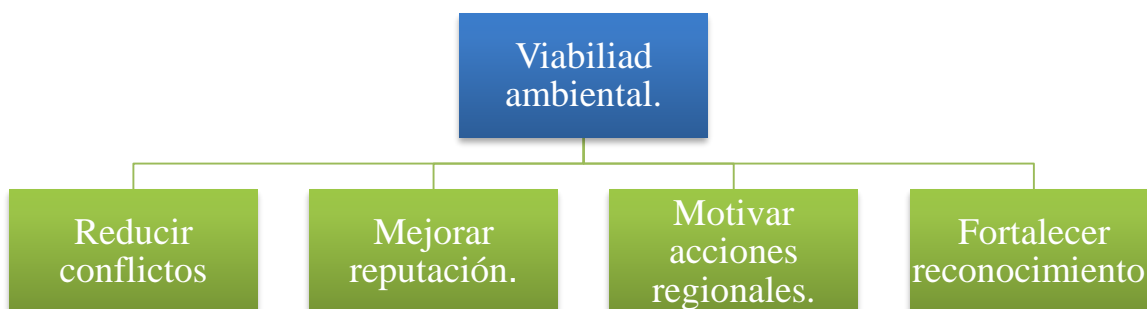


**Nota:** Se describe la Normatividad legal de Ecopetrol S.A. Ley 1118 de 2006, Código de buen gobierno, Código de ética y estatutos sociales y el reglamento de accionistas y junta directiva.

Para el caso de la viabilidad ambiental Ecopetrol busca mejorar los procesos de autorizaciones e implementar acciones de fortalecimiento interinstitucional cuyos objetivos son los indicados en la **figura 12**.

**Figura 13**

*Objetivos viabilidad ambiental.*



**Nota:** Normatividad legal de la viabilidad ambiental.

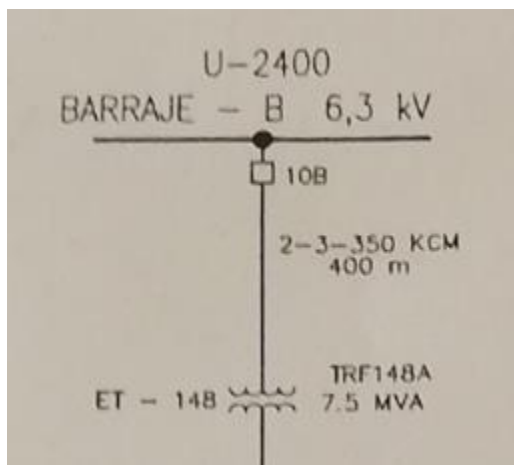
En este capítulo se identifican los sistemas y subsistemas que hacen parte de la unidad operativa POLY I de la refinería Barrancabermeja, con la intención de establecer cuál es la información disponible de los sistemas eléctricos y de esta forma establecer cuáles serán las variables o datos de entrada del aplicativo.

**4.4. Sistemas y subsistemas de la subestación POLY I.**

La subestación POLY I está conformada por barras de distribución, transformadores e interruptores y cuyo nivel de tensión de entrada es de 6,3kV reducidos mediante el TRF148A a 2,4kV esto se puede observar en la **figura 13**.

**Figura 14.**

*Sistemas y subsistemas de la estación POLY I*



**Nota.** Transformador de entrada a la subestación POLY I.

Para efectos de organizar los análisis de arco eléctrico se definirán los sistemas y subsistemas como se indica en la **tabla 4**. Los cálculos a realizar por el aplicativo computacional serán aplicados a los transformadores de la subestación tomando como guía el anexo D de la norma NFPA 70E llamado Métodos de cálculo de energía incidente y fronteras de aproximación por relámpago de arco.

**Tabla 4.**

*Sistemas y subsistemas de subestación POLY I.*

TAG	Sistema	Subsistema
TRF148A	Transformador 7,5MVA	
TRF148C	Transformador 750kVA	

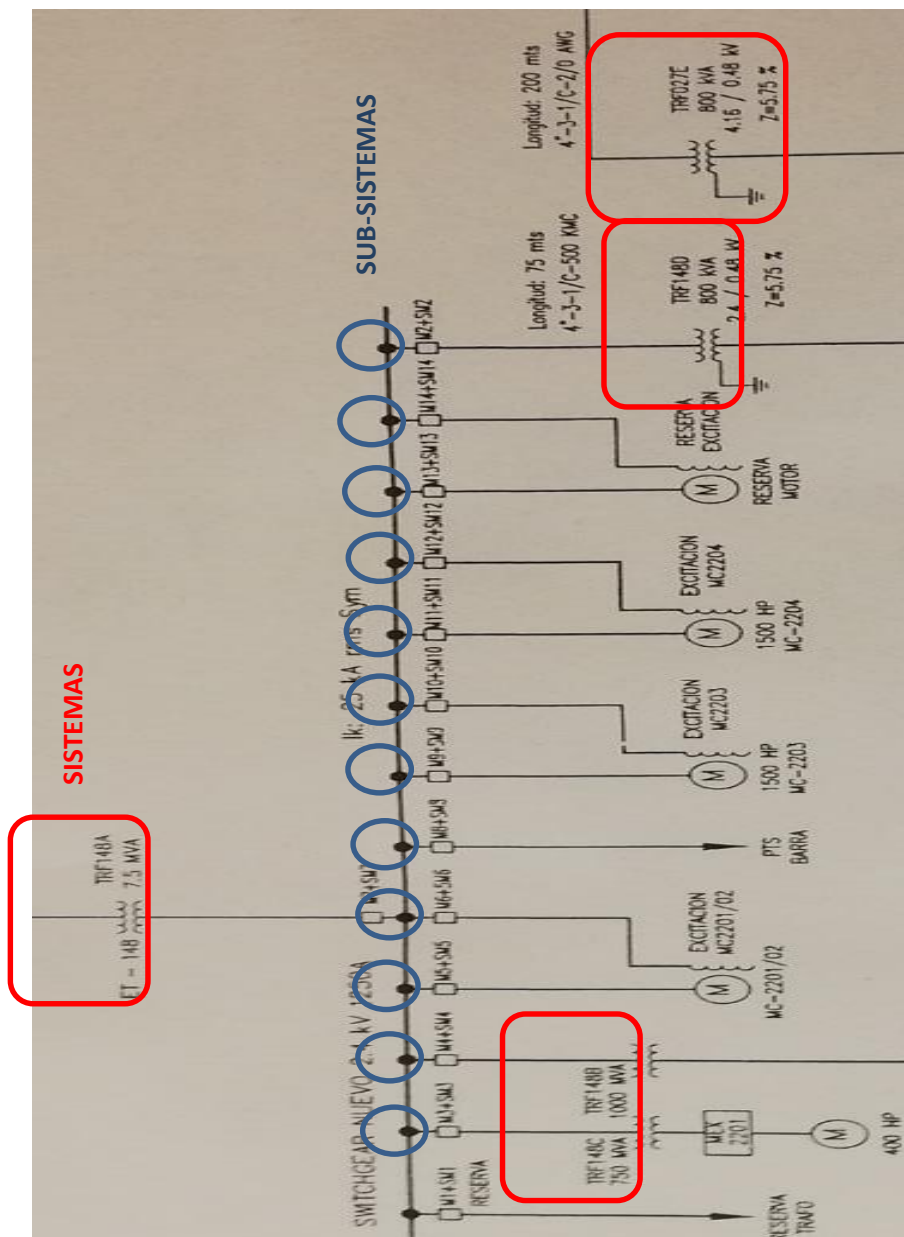
TRF148B	Transformador 1MVA
TRF148D	Transformador 800kVA
TRF027E	Transformador 800kVA
M3+SM3	Protección de Transformador 7,5MVA
M4+SM4	Protección de Transformador 1MVA
M5+SM5	Protección de motor MC-2201
M6+SM6	Protección excitación de motor MC-2201
M8+SM8	Protección PTS Barra.
M9+SM9	Protección de motor MC-2203
M10+SM10	Protección excitación de motor MC-2203
M11+SM11	Protección de motor MC-2204
M12+SM12	Protección excitación de motor MC-2204
M13+SM13	Protección de motor reserva
M14+SM14	Protección excitación reserva
M2+SM2	Protección Transformador 800kVA

**Nota.** Organización de los análisis del arco eléctrico.

Los transformadores mencionados en la **tabla 4** se presentan en el diagrama unifilar de la **figura 14**, y en la **figura 15** se observan estos equipos.

**Figura 15.**

*Sistemas y subsistemas de subestación POLY I.*



**Nota.** Diagrama unifilar subestación POLY I.

**Figura 16.**

*Transformadores subestación POLY I.*



**Nota.** Estructura y ubicación de los transformadores de la subestación POLY I

**4.5. Datos de entrada para aplicativo computacional según Anexo D de NFPA 70E.**

Para realizar el estudio de arco eléctrico en la subestación POLY I mediante el aplicativo computacional se utilizó como guía para realizar los diferentes cálculos la norma NFPA 70 E **Anexo D** y otros apartados de la misma norma como se presentará a continuación.

#### 4.5.1. Fronteras de aproximación – Dato de entrada: Tensión de red.

Para realizar un estudio de arco eléctrico es necesario también determinar las fronteras de aproximación, y según lo establece la norma NFPA 70E cada vez que se realice una modificación o renovación se deberán actualizar los cálculos, es por esta razón que el aplicativo computacional cumple un papel importante. En la **tabla 5** se indican los valores en metros para las diferentes fronteras según el valor de tensión de la celda o transformador.

**Tabla 5.**

*Fronteras de aproximación según NFPA 70E*

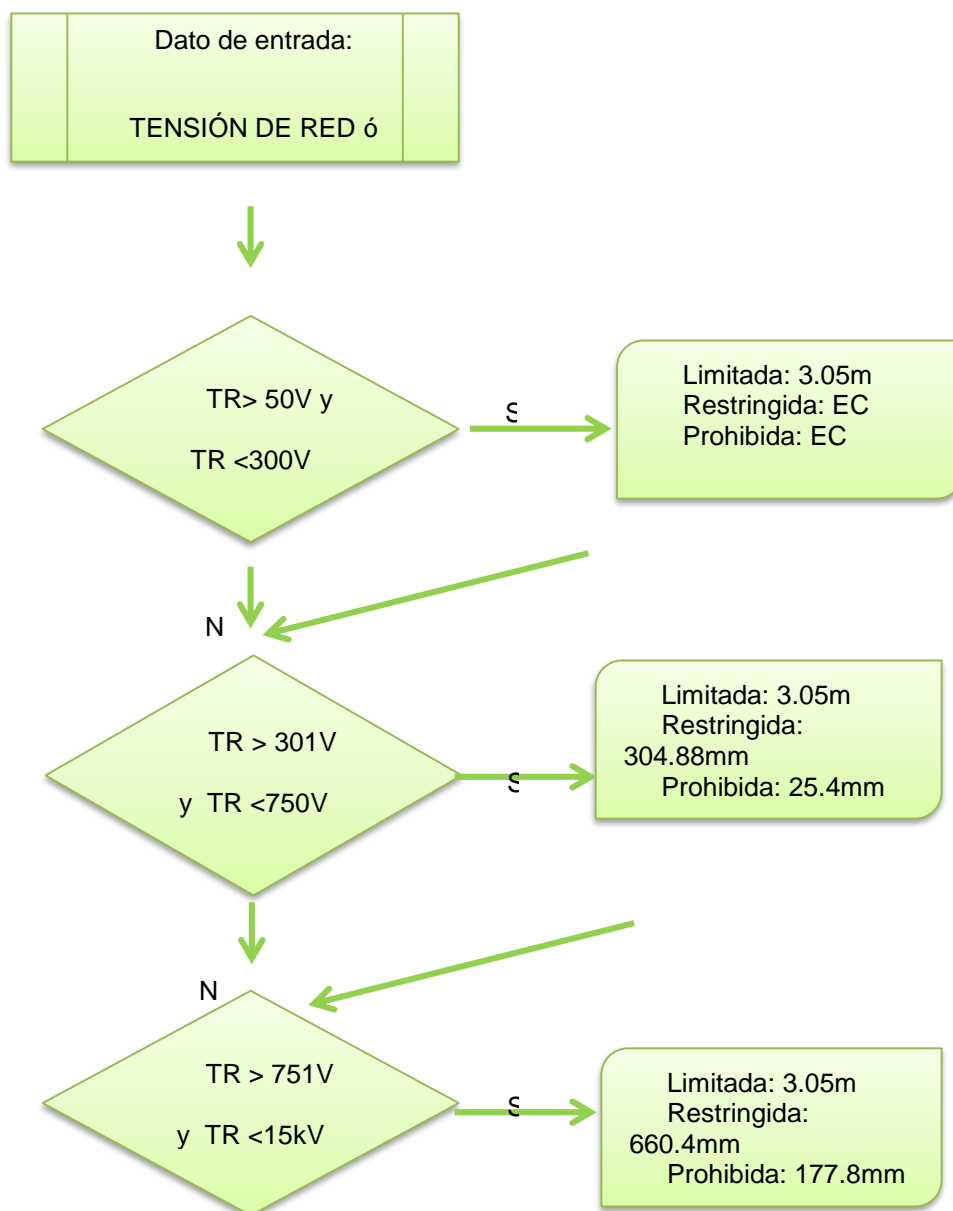
Rango de tensión.	Frontera limitada.	Frontera restringida	Frontera prohibida
Menos de 50V	No específica	No especifica	No especifica
50-300V	3.05m	Evitar contacto	Evitar contacto
301V-750V	3.05m	304.88mm	25.4mm
751V-15kV	3.05m	660.4mm	177.8mm
15.1V-36kV	3.05m	787.4mm	254mm
36.1kV-46kV	3.05m	838.2mm	431.8mm
46.1kV-72.5kV	3.05m	1m	660mm
72.6kV-121kV	3.25m	1.29m	838mm
138kV-145kV	3.36m	1.15m	1.02m
161kV-169kV	3.56m	1.29m	1.14m
230kV-242kV	3.97m	1.71m	1.57m
345kV-362kV	4.68m	2.77m	2.79m
500kV-550kV	5.8m	3.61m	3.54m
765kV-800kV	7.24m	4.84m	4.7m

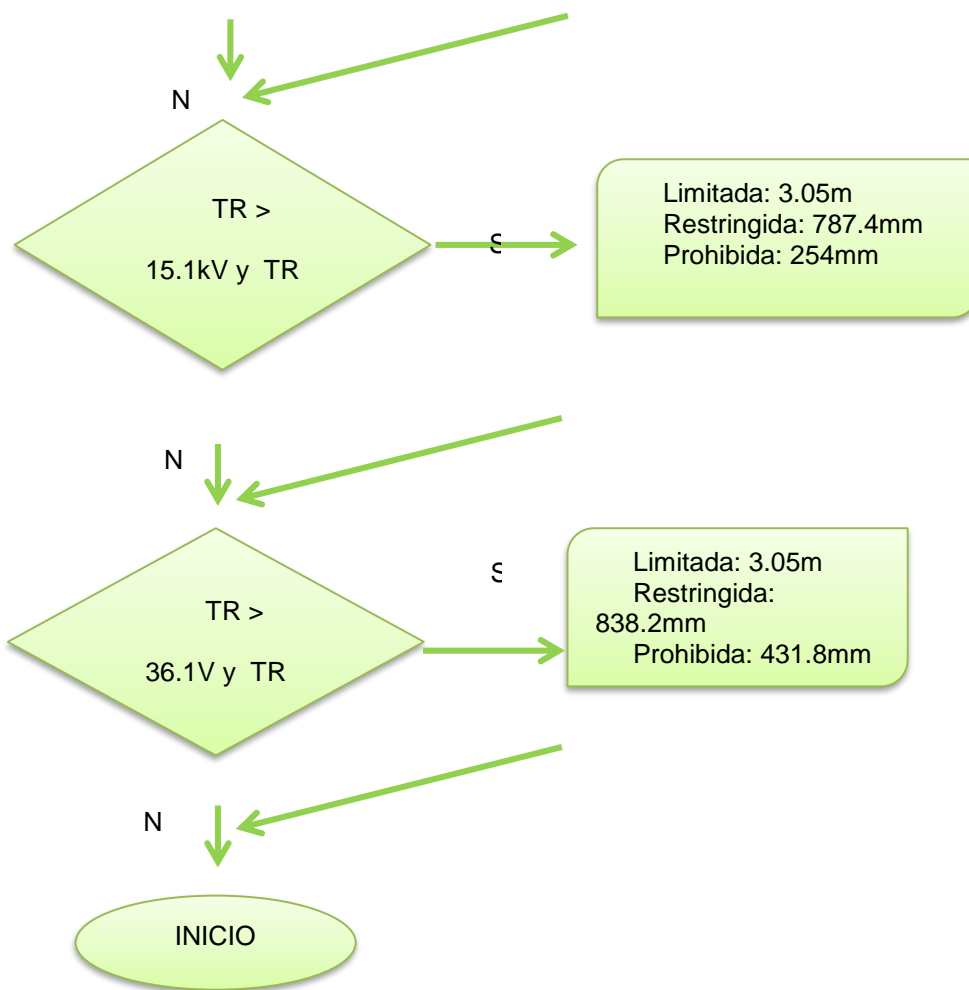
**Nota:** NFPA 70E, tabla 130.2(C), Fronteras de aproximación, p. 25.

Para que el aplicativo computacional determine las fronteras de aproximación se ejecutara el algoritmo de la **figura 16** este evalúa cual es la tensión de entrada y realiza una serie de comparaciones y define cuales son las fronteras según el valor ingresado.

**Figura 17.**

*Fronteras de aproximación según NFPA 70E.*





**Nota.** Algoritmo para determinar fronteras de aproximación.

**4.5.2. Casco y guantes dieléctricos – Dato de entrada: Tensión de red.**

La variable de entrada que determina la clasificación tanto de los guantes como del casco es la tensión de red. La norma europea EN 60903 y ASTM D 120 clasifica los guantes como se establece

la **tabla 6** cuyos valores pueden oscilar entre 500V y 36kV. Para el caso de los cascos la norma NTC 1523 apartados 4.6.1 y 4.6.2. indican tensiones eficaces de entre 2kV y 20kV como se observa en la tabla 7. Es importante señalar que para el caso de los cascos los valores de tensión eficaz se ajustan a lo indicado en la norma ANSI Z89.1 que es la establecida en la NFPA 70E tabla 130.7(C).

**Tabla 6.**

*Clasificación de guantes dieléctricos EN60903 y ASTM D120*

Clase	Tensión utilización V	Tensión prueba min V.	Tensión de ruptura V.
00	500	2500	8000
0	1000	5000	20000
1	7500	10000	40000
2	17500	20000	60000
3	26500	30000	70000
4	36500	40000	90000

**Nota:** Guantes para trabajos con electricidad, EN60903, Recuperado de <http://www.epibaleaer.es/noticia.aspx?Noticia=3290>

**Tabla 7.**

*Clasificación de cascos dieléctricos según ANSI Z89.1 y NTC 1523.*

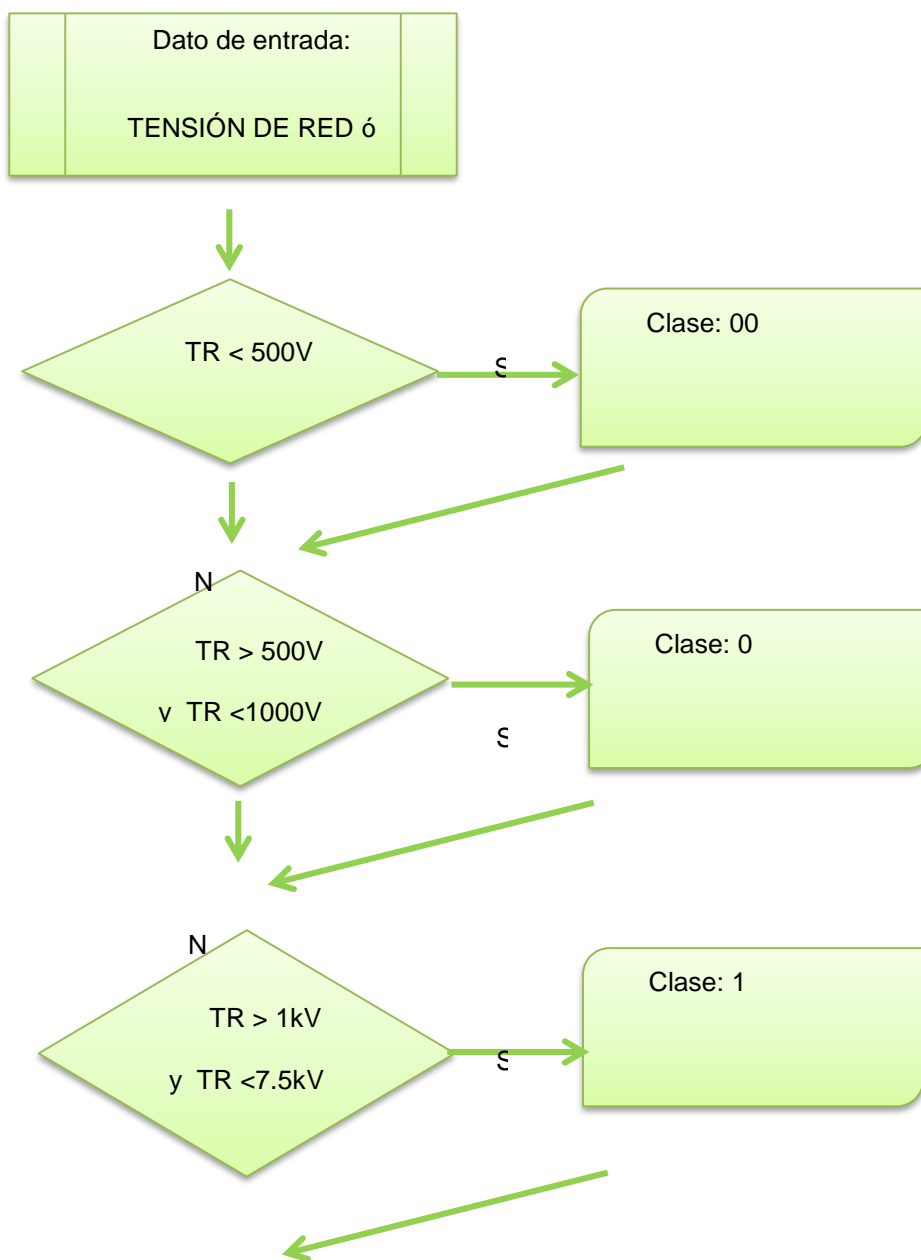
Clase	Voltaje eficaz V
A y D	2200
B	20000

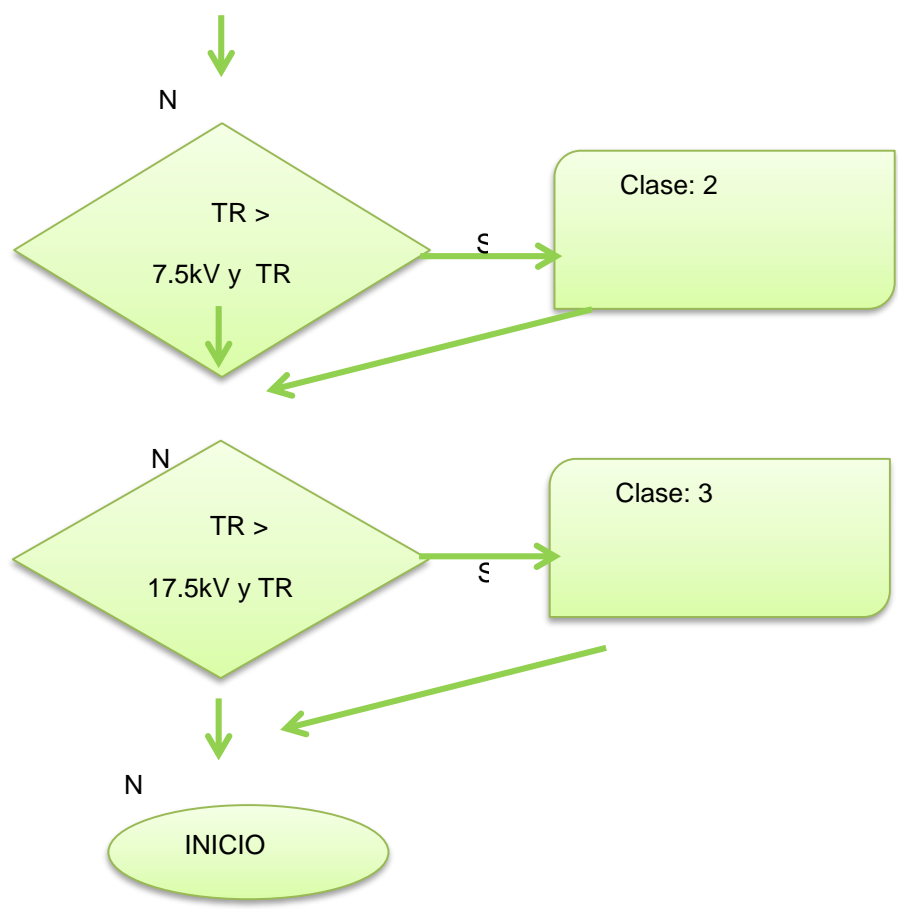
**Nota:** NTC 1523, cascos de seguridad industrial, p. 5.

Esta información es importante ya que a través de ella se implementaran los algoritmos de las **figuras 17 y 18** en el aplicativo computacional, para ello se utilizan una serie de interrogantes según sea el nivel de tensión para realizar la clasificación del caso y guantes.

**Figura 18.**

*Casco y guantes dieléctricos.*

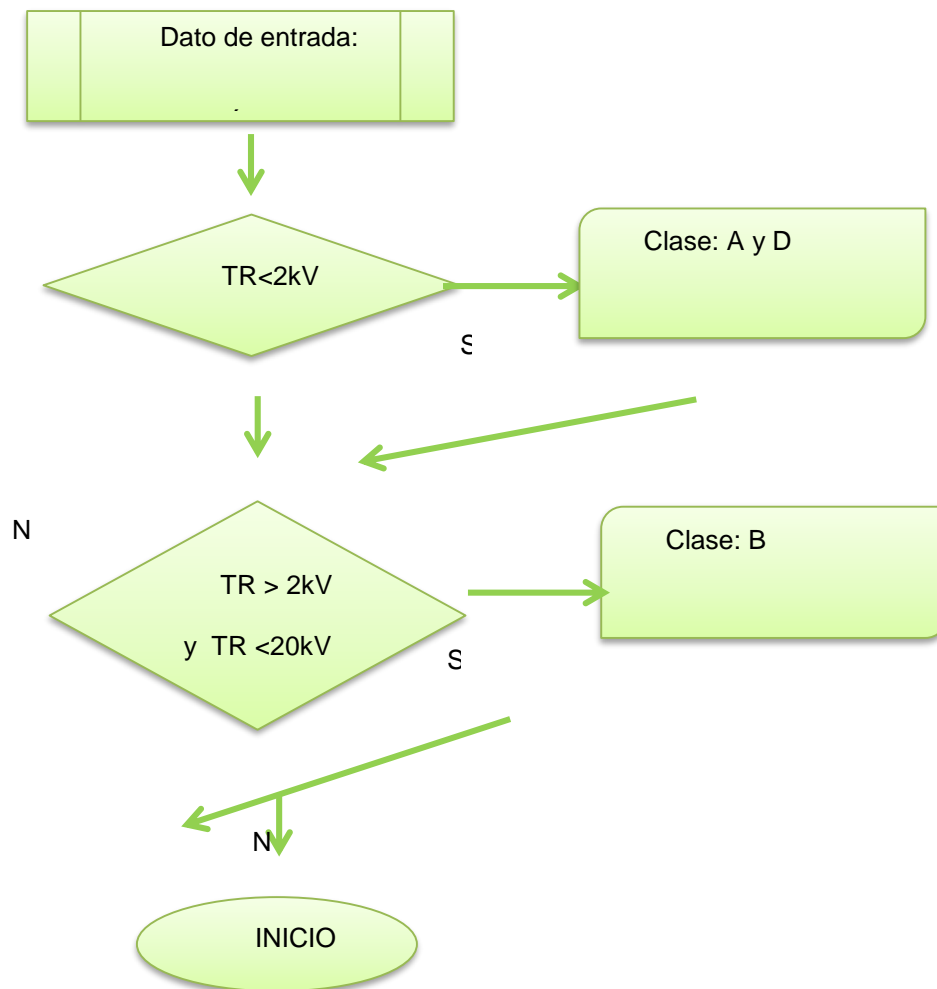




**Nota:** Algoritmo para realizar clasificación de guantes.

**Figura 19.**

*Casco y guantes dieléctricos.*



**Nota:** Algoritmo para realizar clasificación de cascos

**4.5.3. Categoría de traje, cortocircuito y energía incidente**

En cuanto a la categoría de traje la norma NFPA 70E en la tabla 130.7(C) establece las características de la ropa de protección siendo entonces el dato de entrada para determinar el traje la energía incidente [cal/m<sup>2</sup>], como se observa en la **tabla 8**.

**Tabla 8**

*Características de traje de protección.*

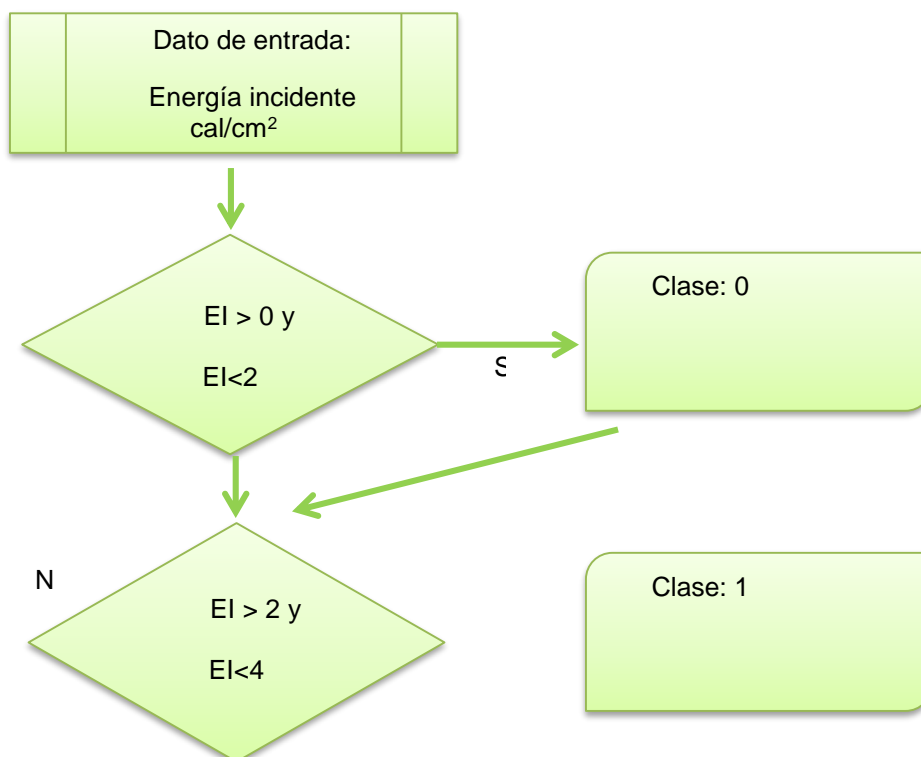
Categoría de traje	Energía incidente cal/cm <sup>2</sup>
0	0 - 2
1	2.1 - 4
2	4.1 - 8
3	8.1 - 24.9
4	25 - 40

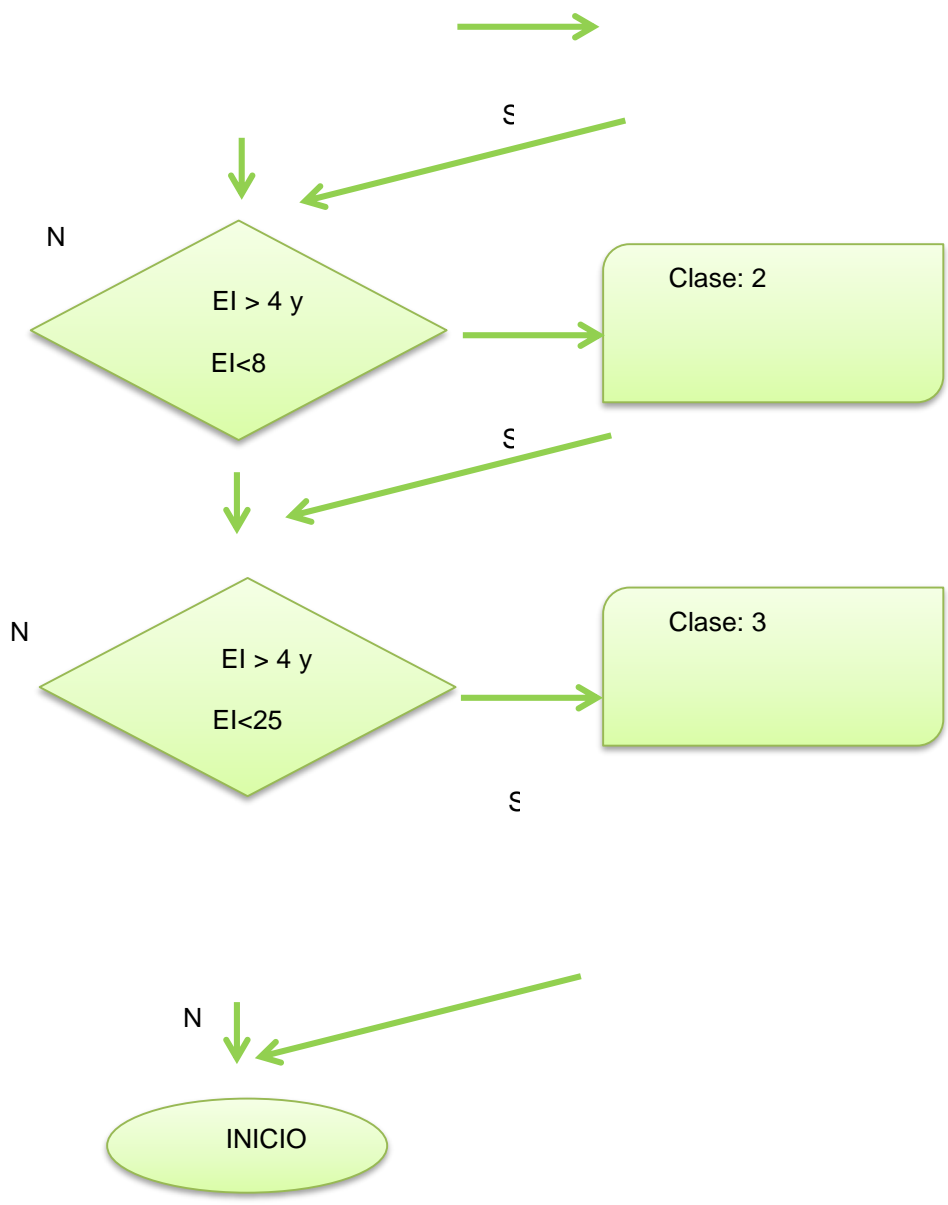
**Nota:** NFPA 70E tabla 130.7(C), p. 36

El algoritmo que se implementa en el aplicativo computacional para determinar de forma automática la categoría del traje está indicada en la **figura 19**.

**Figura 20.**

*Características de traje de protección.*





**Nota.** Algoritmo para determinar traje de protección.

Para el caso de la corriente de cortocircuito se aplica la **ecuación 1** en este caso los datos de entrada son potencia del transformador (MVA), voltaje de la red (V) e impedancia del transformado %Z.

### Ecuación 1

*Corriente de cortocircuito.*

$$I_{SC} = \{[MVA]/[1.732 * V]\} * [100/\%Z]$$

**Nota.** Anexo D, NFPA 70E p. 61.

Para el caso de la energía incidente la norma NFPA 70E hace referencia de dos alternativas para realizar el cálculo, la primera de ellas denominado arco abierto al aire libre establece la **ecuación 2**.

### Ecuación 2.

*Máxima energía incidente en arco abierto al aire libre cal/cm<sup>2</sup>*

$$E_{MA} = 5271 D_A^{-1.9593} t_A [0.0016 F^2 - 0.0076 F + 0.8938]$$

**Nota:** (NFPA 70E, p. 62)

Dónde:

- $E_{MA}$ : Máxima energía incidente en cal/cm<sup>2</sup>.
- $D_A$ : Distancia a los electrodos del arco.
- $t_A$ : Duración en segundos.
- $F$ : Corriente de cortocircuito falla sólida, kA.

Como segunda opción presenta arco en una caja cubica en la cual se utiliza la **ecuación 3** para determinar la energía incidente.

**Ecuación 3.**

*Máxima energía incidente en arco caja cubica cal/cm2*

$$E_{MB} = 1038.7 D_B^{-1.4738} t_A [0.0093 F^2 - 0.3453 F + 5.9675]$$

**Nota:** (NFPA 70E, p. 62)

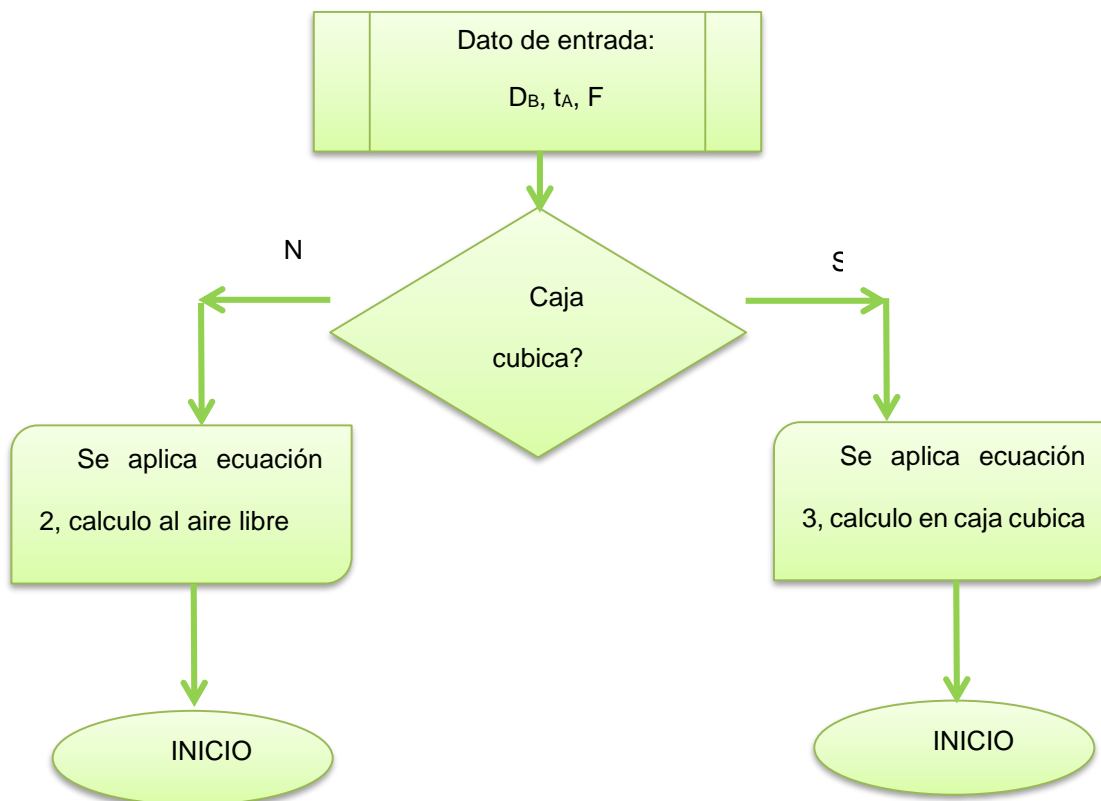
Dónde:

- $E_{MB}$ : Máxima energía incidente en cal/cm<sup>2</sup>.
- $D_B$ : Distancia a los electrodos del arco.
- $t_A$ : Duración en segundos.
- $F$ : Corriente de cortocircuito falla sólida, kA.

Ahora bien, el aplicativo computacional ejecuta el algoritmo de la **figura 20** aquí lo primero que determina es, si la opción es caja cubica o al aire libre y después de esto realizar el cálculo según corresponda.

**Figura 21.**

*Datos de entrada*



**Nota.** Algoritmo para calcular energía incidente.

**5. Desarrollo de aplicativo computacional aplicado a las unidades de generación de la refinería Barrancabermeja GRB.**

En este capítulo se lleva a cabo el desarrollo del aplicativo computacional que está basado en hojas de cálculo o plantillas de Excel, y que permite realizar cálculos de arco eléctrico de forma

general. Sin embargo, se centra en la subestación eléctrica de la Unidad operativa POLY I de las unidades de generación eléctrica de la refinería Barrancabermeja. En la **figura 21** se observa las funciones que se han implementado en dicho aplicativo y que cumple las expectativas de un estudio de arco según lo establece la NFPA 70E, los tres aspectos que se analizan son fronteras de aproximación, elementos de protección personal (casco – guantes dieléctricos), energía incidente, corto circuito y categoría de traje.

**Figura 22.**

*Funciones del aplicativo computacional.*



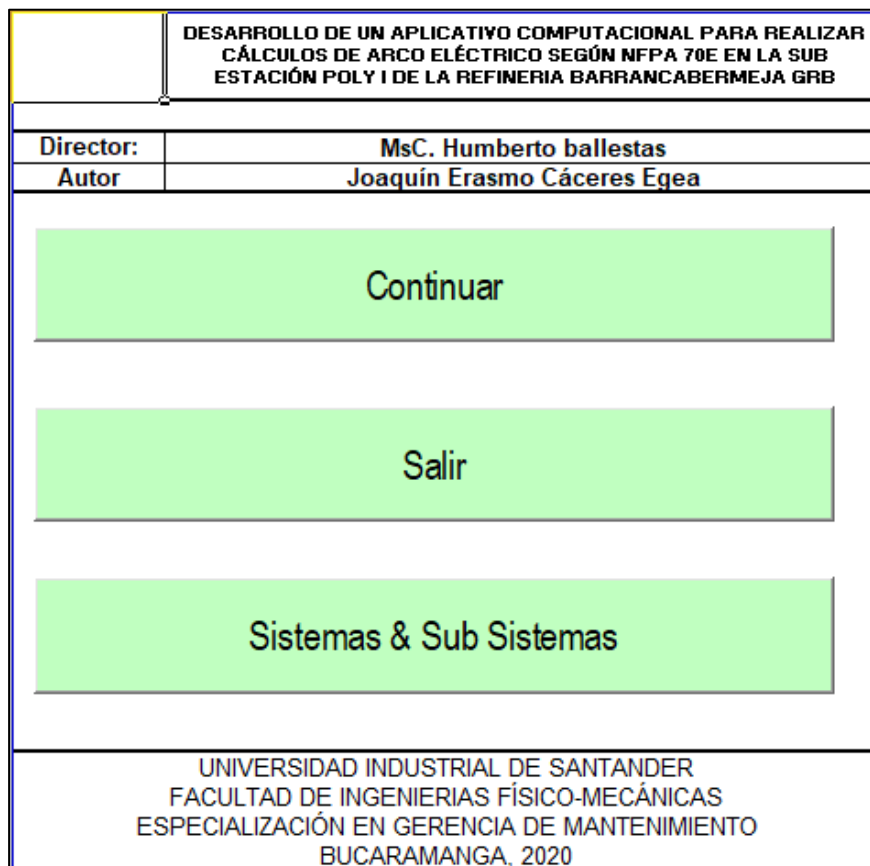
**Nota.** Descripción de la funcionalidad del aplicativo computacional.

**5.1. Ventana inicial del aplicativo computacional.**

En esta primera ventana, ver **figura 22** se observan dos opciones que permiten continuar con el análisis de arco eléctrico o salir del aplicativo, adicionalmente se incluye un tercer botón llamado sistemas y subsistemas de la subestación POLY I.

**Figura 23.**

*Ventana inicial del aplicativo computacional.*



**Nota.** Opciones del aplicativo para analizar el arco eléctrico.

### 5.1.1. Ventana de sistemas y subsistemas POLY I.

Esta ventana, ver **figura 23** tiene la intención de presentarle al usuario de forma rápida y organizada cuales son los sistemas y subsistemas que componen la subestación POLY I que hace

parte de las unidades de generación de la refinería Barrancabermeja, adicionalmente aquí se incluye un nuevo botón llamado diafragma el cual al dar clic sobre el generara un documento en PDF con el unifilar de la subestación, ver **figura 24**.

**Figura 24.**

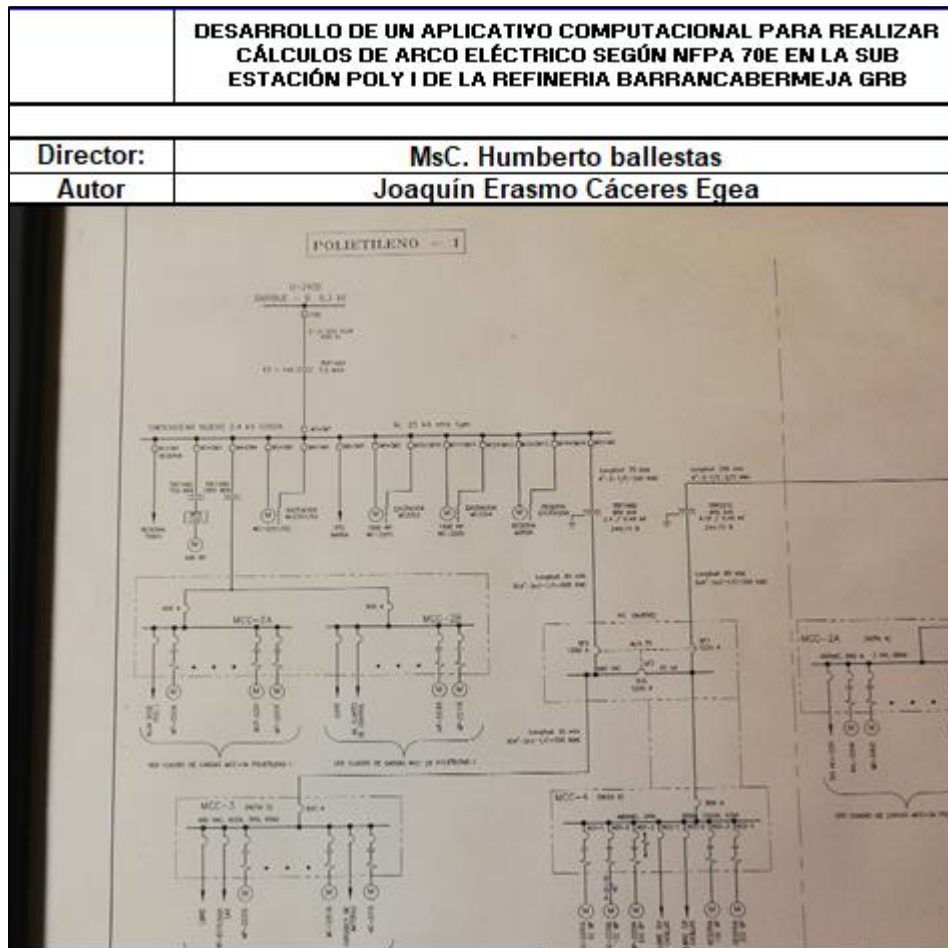
*Ventana de sistemas y subsistemas de la subestación POLY I.*

<b>DESARROLLO DE UN APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA REALIZAR CÁLCULOS DE ARCO ELÉCTRICO SEGÚN NFPA 70E EN LA SUB ESTACIÓN POLY I DE LA REFINERIA BARRANCABERMEJA GRB</b>		
<b>Director: MsC. Humberto ballestas</b>		
<b>Autor Joaquín Erasmo Cáceres Egea</b>		
<b>DIAGRAMA UNIFILAR</b>		
TAG	SISTEMA	SUBSISTEMA
TRF148A	Transformador 7,5 MVA	
TRF148C	Transformador 750 kVA	
TRF148B	Transformador 1 MVA	
TRF148D	Transformador 800 kVA	
TRF027E	Transformador 800 kVA	
M3+SM3		Protección de TRF 7,5 MVA
M4+SM4		Protección de TRF 1 MVA
M+SM5		Protección de motor MC2201
M6+SM6		Protección de excitación de motor MC2201
M8+SM8		Protección PTS Barra
M9+SM9		Protección de motor MC2203
M10+SM10		Protección de excitación de motor MC2203
M11+SM11		Protección de motor MC2204
M12+SM12		Protección de excitación de motor MC2204
M13+SM13		Protección de motor reserva
M14+SM14		Protección de excitación reserva
M2+SM2		Protección TRF 800 KVA

**Nota.** Presentan los sistemas y subsistemas que presenta la aplicación

**Figura 25**

*Informe de diagrama unifilar subestación POLY I.*



**Nota.** Informe realizado a través de la aplicación

## 5.2. Ventana que indica las fronteras de aproximación.

Esta opción, ver **figura 25** permite identificar cuáles serán las fronteras de aproximación dentro de la subestación POLY I, aquí se incluyen los datos de entrada que para el caso son tensión de la red o transformador y tipo de circuito (monofásico, bifásico, trifásico), este dato es importante ya que la norma NFPA 70E indica que para sistemas monofásicos se selecciona el rango que es igual que el máximo voltaje de fase a tierra multiplicado por 1.732.

### **Figura 26.**

*Ventana que indica las fronteras de aproximación.*

<b>Director:</b>	<b>MsC. Humberto ballestas</b>		
<b>Autor</b>	<b>Joaquín Erasmo Cáceres Egea</b>		
Rango de Voltaje:	<input type="text" value="46100 a 72500"/>	Frontera Limitada:	<input type="text" value="2,44 m"/>
		Frontera Restringida:	<input type="text" value="1,0 m"/>
Tipo de Circuito:	<input type="text" value="Monofásico"/>	Frontera Prohibida:	<input type="text" value="660 mm"/>
<b>Página 1</b>			
<input type="button" value="Calcular"/>			
<input type="button" value="Elementos de Protección Personal"/>			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO BUCARAMANGA, 2020			

**Nota.** En esta ventana indica el rango para los diferentes sistemas.

### 5.3. Ventana elementos de protección personal (casco y guantes).

En cuanto a la ventana de elementos de protección personal se tienen dos opciones como se observa en la **figura 26** aquí se ingresa la tensión de la red y después de dar clic en el botón calcular se presentará la categoría de cada uno de estos elementos.

**Figura 27**

*Ventana para determinar categoría de casco y guantes.*

<b>Director:</b>	<b>MsC. Humberto ballestas</b>		
<b>Autor</b>	<b>Joaquín Erasmo Cáceres Egea</b>		
Rango de Voltaje Casco:	<input type="text" value="7500"/>	Clasificación Casco:	<input type="text" value="1"/>
Rango de Voltaje Guantes:	<input type="text" value="2200"/>	Clasificación Guantes:	<input type="text" value="A y D"/>
Página 1			
<b>Calcular</b>			
<b>Arco Eléctrico</b>			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO BUCARAMANGA, 2020			

**Nota.** Esta ventana determina los elementos de protección que se deben utilizar

**5.4. Ventana energía incidente y cortocircuito.**

Uno de los valores entregados por el aplicativo computacional para la subestación POLY I es la energía incidente cuya definición según la NFPA 70E es “la cantidad de energía impuesta sobre una superficie a una cierta distancia de la fuente generada durante el evento de arco eléctrico”.

Ahora bien, en esta ventana se ingresan los datos indicados en la **figura 27** que permiten ejecutar de forma automática los cálculos necesarios para determinar energía incidente, categoría de traje y corriente de cortocircuito, adicionalmente se agrega un nuevo botón llamado generar informe el cual entrega los resultados del estudio de arco para ser aplicado en la celda o patio de transformador.

### Figura 28.

*Ventana energía incidente, categoría de traje y corto circuito.*

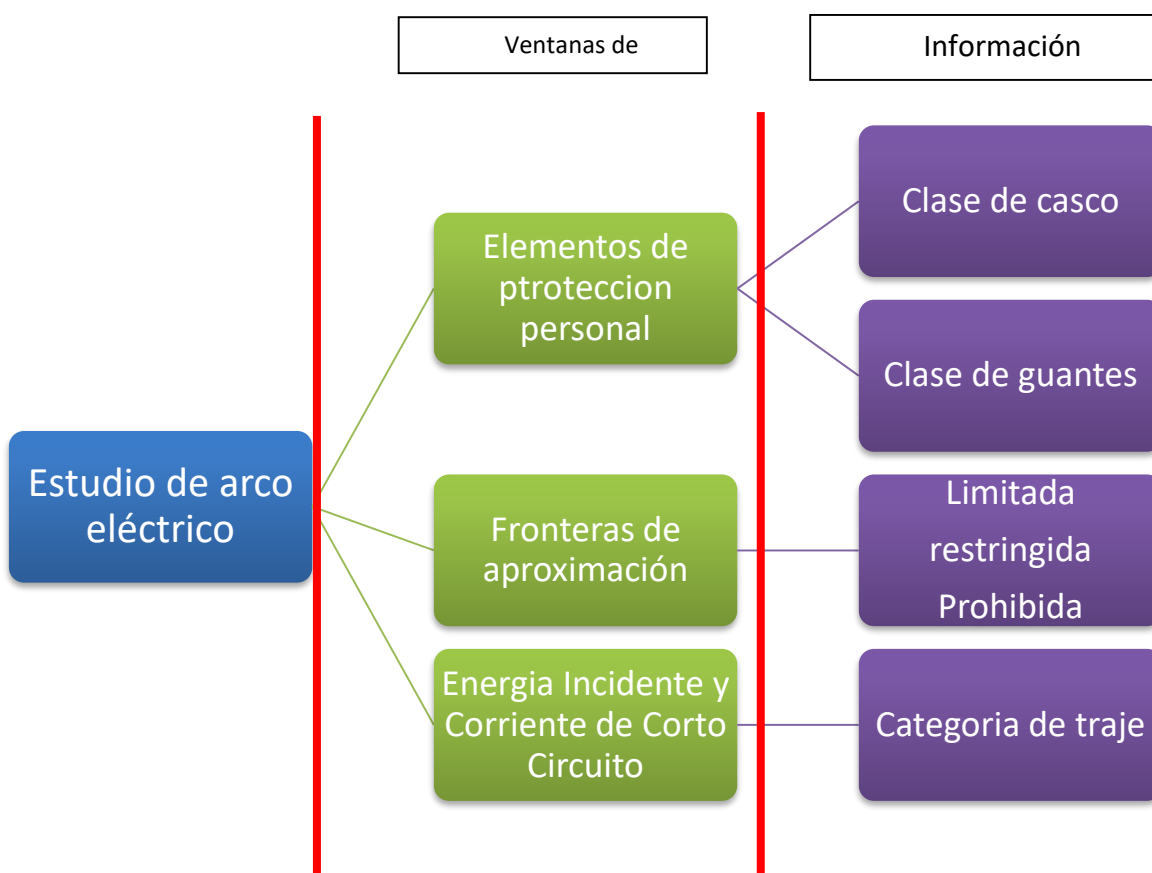
<b>Director:</b>	<b>MsC. Humberto ballestas</b>	
<b>Autor</b>	<b>Joaquín Erasmo Cáceres Egea</b>	
<b><u>Calculo de Energia Incidente Arco Abierto al Aire Libre</u></b>		
Nivel de tensión máximo:	4160	[V]
Potencia aparente del transformador:	8	[MVA]
Impedancia del transformador:	5,5	[%]
Tiempo de limpieza del transformador:	0,2	[Seg]
Distancia entre electrodos transformador:	18	[in]
<b>Cálculo</b>		
Corriente de corto circuito:	20,19	[kA]
Energia incidente calculada:	5,10	[cal/cm <sup>2</sup> ]
<b>Informe</b>		
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO BUCARAMANGA 2020		

**Nota.** Ventana que permite ejecutar de forma inmediata los cálculos necesarios para determinar energía incidente, categoría del traje y nivel de corriente de cortocircuito.

El informe generado automáticamente por el aplicativo computacional entregara la información necesaria (ver figura 28) para señalar el área con el fin de garantizar un trabajo seguro en la ejecución de las actividades de mantenimiento.

**Figura 29.**

*Datos del informe*



**Nota.** Datos entregados en el informe de estudio de arco eléctrico.

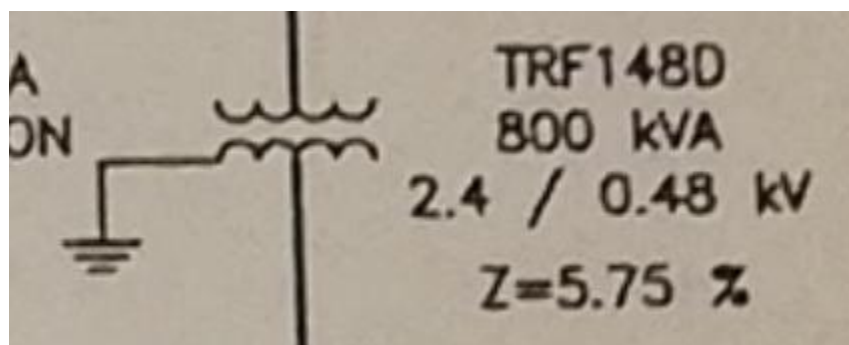
### 5.5. Estudio de arco en transformador TRF148D POLY I.

Para mostrar los resultados obtenidos del desarrollo de este aplicativo se llevará a cabo un estudio de arco para el transformador TRF148D. ver **figura 29**, inicialmente es necesario determinar la información de entrada que para el caso es:

- Potencia aparente: 800kVA.
- Tipo de red: Trifásica.
- Impedancia: 5.75%.
- Distancia entre electrodos del transformador.
- Tiempo de despeje de la falla.
- Voltaje de red: 2.4kV

#### Figura 30.

*TRF 148D en diagrama unifilar.*



**Nota.** estudio de arco para el transformador TRF148D, para determinar la información de entrada

#### 5.5.1. Fronteras de aproximación al TRF148D

Después de ingresar los valores de tensión de red y tipo de circuito que para el caso trifásico, ver **figura 30** se da clic en el botón calcular y se obtiene:

- Limitada: 1.53m

- Restringida: 660.4mm
- Prohibida: 177.8mm

Sin embargo, para comprobar que los valores determinados de forma automática por el aplicativo computacional son correctos se comparan de forma manual con lo indicado en la tabla 130.2(C) de la NFPA 70E, estos resultados se observan en la **tabla 9**.

**Tabla 9.**

*Fronteras de aproximación al TRFI48D*

Frontera	Valor según tabla 130.2(C) NFPA 70E.	Estudio de arco TRFI48A S/E POLY I.
Limitada.	1.53m	1.53m
Restringida.	660.4mm	660.4mm
Prohibida.	177.8mm	177.8mm

**Nota.** Comparación entre NFPA 70E y resultados de aplicativo.

**Figura 31.**

*Fronteras de aproximación para TRFI48D*

<b>Director:</b>	<b>MsC. Humberto ballestas</b>		
<b>Autor</b>	<b>Joaquín Erasmo Cáceres Egea</b>		
Rango de Voltaje:	<input type="text" value="751 a 15000"/>	Frontera Limitada:	<input type="text" value="1,53 m"/>
		Frontera Restringida:	<input type="text" value="660,4 mm"/>
Tipo de Circuito:	<input type="text" value="Trifásico"/>	Frontera Prohibida:	<input type="text" value="177,8 mm"/>
<b>Calcular</b>			

**Nota.** Ventana de la aplicación que muestra la comparación entre NFPA 70E y resultados de aplicativo.

**5.5.2. Clasificación de casco y guantes para trabajar en TRF148D subestación POLY I.**

De acuerdo al nivel de tensión que para el caso del transformador TRF148D es de 2.4kV las características del caso y los guante son los indicados en la **figura 31**, estos valores al ser comparados con las tablas 6 y 7 de este documento permiten ver que los resultados entregados por los algoritmos programados en el aplicativo computacional son correctos (ver tabla 10)

**Tabla 10.**

*Clasificación de casco y guantes.*

EPP	Según EN60903 y ASTM D120 para guantes y ANSI Z89.1 y NTC 1523 para caso.	Estudio de arco TRF148A S/E POLY I.
Casco	B	B
Guantes	1	1

**Nota.** Comparativa entre cálculos automáticos y manuales para casco y guantes.

**Figura 32.**

*Clasificación de guantes y casco para trabajar en TRF148D*

<b>Director:</b>	<b>MsC. Humberto ballestas</b>		
<b>Autor</b>	<b>Joaquín Erasmo Cáceres Egea</b>		
Rango de Voltaje guantes:	<input type="text" value="7500"/>	Clasificación Casco:	<input type="text" value="1"/>
Rango de Voltaje casco:	<input type="text" value="20000"/>	Clasificación Guantes:	<input type="text" value="B"/>
<p>Página 1</p> <p>Calcular</p>			

**Nota.** Ventana que indica la clasificación de casco y guantes.

**5.5.3. Corriente de cortocircuito, energía incidente y traje para actividades en el transformador TRF148D de la subestación POLY I.**

En esta ocasión se cargan los datos de entrada al aplicativo computacional y este arroja los resultados indicados en la **figura 32** aquí se observa la información necesaria para determinar las características un traje como el de la **figura 33**.

**Figura 33.**

*Resultados de arco eléctrico para TRF148D subestación POLY I.*

<b>Director:</b>	<b>MsC. Humberto ballestas</b>	
<b>Autor</b>	<b>Joaquín Erasmo Cáceres Egea</b>	
<b>Calculo de Energia Incidente Arco Abierto al Aire Libre</b>		
Nivel de tensión máximo:	2400	[V]
Potencia aparente del transformador:	0,8	[MVA]
Impedancia del transformador:	5,75	[%]
Tiempo de limpieza del transformador:	0,2	[Seg]
Distancia entre electrodos transformador:	18	[in]
<b>Cálcular</b>		
Corriente de corto circuito:	3,35	[kA]
Energia incidente calculada:	3,24	[cal/cm <sup>2</sup> ]
<b>Informe</b>		
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO BUCARAMANGA, 2020		

**Nota.** Ventana del aplicativo computacional que muestra los resultados del arco eléctrico.

**Figura 34.***Traje Arc Flash*

**Nota.** Imagen del traje Arc Flash para la seguridad eléctrica

Para comprobar que cálculos realizados por los algoritmos se ejecutan correctamente se comparan los resultados entregados por el aplicativo y un ejemplo que se encuentra en la norma NFPA 70E p.63. En el caso de arco abierto al aire libre se ingresan y caja cubica se ingresan los siguientes datos:

- $D_A = 18$  in
- $t_A = 0.2$  segundos
- $F = 20$  kA.

Los resultados de ambos análisis se tabularon en la **tabla 11** y como se observa en la figura 34 se ingresaron los mismo resultados en el aplicativo para ambos casos, como se observa en la tabla 9 estos resultados presentan diferencia en los decimales que no implican cambios representativos a la hora de seleccionar las características del traje.

**Figura 35.**

*Comparación de resultados entre aplicativo y norma.*

**Calculo de Energia Incidente Arco Abierto al Aire Libre**

Nivel de tensión máximo:  [V]

Potencia aparente del transformador:  [MVA]

Impedancia del transformador:  [%]

Tiempo de limpieza del transformador:  [Seg]

Distancia entre electrodos transformador:  [in]

Cálcular

Corriente de corto circuito:  [kA]

Energia incidente calculada:  [cal/cm<sup>2</sup>]

Informe

**Nota.** Ventana comparación de resultados de los diferentes mecanismos de medición y análisis.

**Tabla 11.**

*Comparación de resultados NFPA 70E y aplicativo.*

Aire libre NFPA 70E	Aire libre aplicativo
5.098cal/cm <sup>2</sup>	5.07cal/cm <sup>2</sup>

**Nota.** Comparación de resultados de los diferentes mecanismos de medición y análisis.

**5.5.4. Informe de resultados para el caso del transformador TRF148D**

Después de realizar este análisis para el transformador TRF148D de la subestación POLY I se da clic directamente en el aplicativo computacional en la opción informe y este se encarga de entregar los resultados indicados en la **figura 35**, de esta forma es claro que ente cualquier cambio o remodelación en la subestación será posible determinar si

es necesario realizar algún cambio en los elementos de protección personal o fronteras de aproximación.

### Figura 36.

*Resultados del estudio para el transformador TRF*

Camiseta y pantalón de arco, categoría	si	Límite de aproximación seguro.	1,53 m
Guantes dieléctricos	si	Límite de aproximación restringido	660,4 mm
Casco dieléctrico	si	Límite de aproximación prohibido	177,8 mm
Calzado dieléctrico	si	Límite de aproximación por marco eléctrico	0,89 m
Protección auditiva	si	Energía incidente	3,24 cal/cm <sup>2</sup>
Tensión	si	Corriente de corto circuito	3,35 kA
Protección facial	si		

**Nota.** Elementos de protección y distancia segura.

## 6. Desarrollo de un manual de usuario para la operación del aplicativo computacional.

A través de este manual de usuario la personal calificada según el RETIE podrá realizar la manipulación del aplicativo computacional y dar una correcta interpretación a los resultados. Este manual de usuario cuenta con:

- Guía de inspección de la subestación POLY I.
- Reglas de oro durante trabajos con energía eléctrica.
- Aplicación de bloqueo y etiquetado en sistemas interruptores de subestación POLY I.

- Configuración y habitación de marcos en Microsoft Excel.
- Aspectos relevantes que se deben tener en cuenta para que los datos ingresados en el aplicativo sean los correctos de acuerdo al lugar en el cual se va a realizar el estudio.

De esta forma se presenta al usuario una guía completa para la correcta manipulación e interpretación de los datos entregados.

Manual de usuario del  
aplicativo computacional  
para realizar estudio de arco  
eléctrico en la subestación  
POLY I de la GRB según  
NFPA 70E.

***JOAQUÍN ERASMO CÁCERES EGEA.***

### 6.1. Guía de inspección de la subestación POLY I.

Antes de ingresar al área donde se realizará el estudio de arco se deben garantizar unas condiciones seguras que garanticen la integridad del personal que allí se encuentra; por esta razón se inicia desarrollado un plan de inspección según lo establece la NFPA 70E artículo 110 que tiene la intención de establecer las practicas necesarias para garantizar la seguridad del empleado en el lugar de trabajo. En la **figura 36** se indican los requisitos generales de trabajo con la seguridad eléctrica.

**Figura 37.**

Guía de inspección de la subestación POLY I



**Nota.** Acciones para garantizar condiciones de trabajo seguro.

### 6.1.1. Requisitos de entrenamiento.

A través de la **tabla 12** se establecen los parámetros necesarios según la NFPA 70E que se deben cumplir en cuanto al entrenamiento de los empleados, si alguno en alguno de estos ítems la respuesta es NO, la persona no podrá ingresar a la subestación a recopilar la información que permite realizar el estudio de arco eléctrico.

**Tabla 12.**

*Requisitos de entrenamiento subestación POLY I.*

Requisito	SI	NO
El empleado comprende los riesgos específicos relacionados con la energía eléctrica.		
Existen documentos que validen que el empleado ha sido capacitado.		
El empleado se encuentra entregado en prácticas de rescate para liberar víctimas que han sufridos descargas eléctricas.		

**Nota.** Parámetros de entrenamiento en los empleados según la NFPA 70 E

### 6.1.2. Prácticas de seguridad.

En la **tabla 13** se establecen los requisitos generales que garanticen que el área de trabajo cuenta con un programa apropiado para la tensión, nivel de energía y condiciones de los circuitos de la subestación POLY I. Si alguno de los ítems de esta tabla la respuesta es NO, se deberán establecer controles que garanticen la integridad del mismo durante la recopilación de información.

**Tabla 13.**

*Programa de seguridad en subestación POLY I.*

Requisito	SI	NO
Se cuenta con un programa de seguridad eléctrica.		
Se cuenta con un procedimiento para trabajar en la frontera de aproximación limitada.		
Se cuenta con un plan o procedimiento de evacuación.		

**Nota.** requisitos generales que garanticen que el área de trabajo cuenta con un programa apropiado para la tensión, nivel de energía y condiciones de los circuitos

**6.1.3. Trabajos mientras se expone a peligros eléctricos.**

Si alguno de los ítems de la **tabla 14** tiene como respuesta un NO, se entenderá que la instalación no cuenta con las condiciones necesarias para salvaguardar a las personas que estarán expuestas a riesgos eléctricos de conductores o partes de circuitos eléctricos.

**Tabla 14.**

*Trabajo mientras se expone a circuitos eléctricos.*

Requisito	SI	NO
Los cables energizados se encuentran fuera del límite de aproximación restringido.		
Se cuenta con un procedimiento claro para la aplicación de bloque y etiquetado.		
La persona que realizara el registro es calificada según el RETIE.		

**Nota.** Requisitos para las condiciones aptas de trabajo en las instalaciones.

**6.1.4. Uso de equipos.**

Si por alguna razón se utilizan equipos de medida o prueba se deben cumplir todos los ítems de la **tabla 15** con el fin de garantizar condiciones de trabajo seguras para el empleado.

**Tabla 15.**

*Trabajo mientras se expone a circuitos eléctricos.*

Requisito	SI	NO
Los equipos de medida cuentan con una hoja de vida donde sea evidente que periódicamente se han inspeccionado en busca de detectar averías.		
Si debe utilizar una extensión eléctrica las clavijas cuentan con su respectivo pin de conexión a tierra.		
El nivel de aislamiento del equipo de medida se encuentra en el rango de operación del circuito sobre el cual se desea operar.		

**Nota.** Cumplimiento de requisitos para el uso de los equipos

**6.2. Reglas de oro en trabajos con electricidad.**

El personal electricista calificado que ingresa a la subestación POLY debe tener presente cuales son las reglas de oro para trabajar en circuitos eléctricos, por esta razón se incluye la imagen de la figura 37.

**Figura 38.**

*Reglas de oro en trabajos con electricidad.*



**Nota:** Reglas de oro en trabajos con electricidad. Recuperado de <https://www.arlsura.com/index.php/173-noticias-riesgos-profesionales/noticias/2383-la-energia-electrica-bajo-control>

### 6.3. Aplicación de bloqueo y etiquetado en subestación POLY I.

Los aspectos a tener en cuenta a continuación no pretenden reemplazar los procedimientos de la subestación POLY I, sin embargo, es una guía que permite verificar si se cumplen las exigencias de la NFPA 70E 120.2 numeral B llamado principios de la ejecución de candado etiqueta. En la **tabla 16** una serie de aspectos a tener en cuenta durante el bloque y etiquetado, cabe resaltar que esta lista de chequeo deberá dar SI en todas las respuestas.

**Tabla 16.**

*Bloqueo y etiquetado.*

Requisito	SI	NO
-----------	----	----

---

Se cuenta con un procedimiento de bloqueo y etiquetado en la subestación POLY I.

---

El personal electricista de la subestación POLY I conoce los procedimientos de bloqueo y etiquetado.

---

Se cuenta con un armario para ubicar los elementos para la aplicación de bloqueo y etiquetado.

---

Los dispositivos de bloqueo deben: contar con una sola llave, cuenta con elemento que permite identificar qué persona lo instalo, el candado puede ser instalado de forma tal que se impide la operación del interruptor.

---

Para los dispositivos de etiqueta: puede ser instalado junto al medio de fijación, cuentan con un enunciado que indique prohibida la manipulación.

---

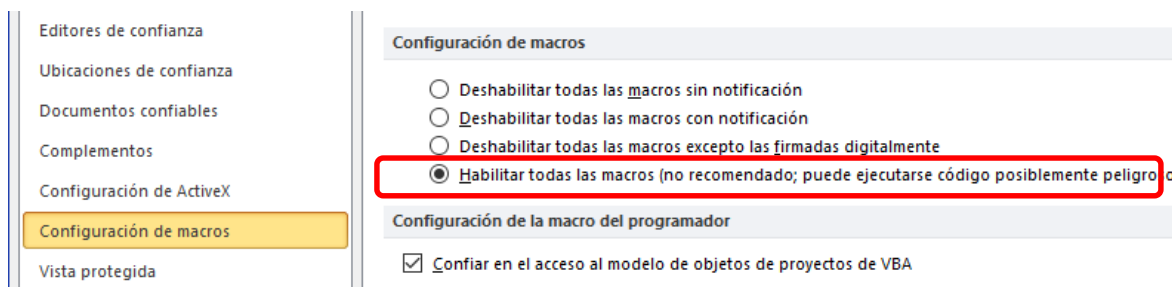
**Nota.** guía que permite verificar si se cumplen las exigencias de la NFPA 70E 120.2 numeral B

#### 6.4. Configurar y habilitar macros en Microsoft Excel.

Al estar el aplicativo computacional desarrollado en macros de Excel la única configuración a realizar es habilitar la opción indicada en la figura 38 y utilizar office superior a 2010.

**Figura 39.**

*Habilitar macros.*



**Nota.** Configuración y habilitación de los macros.

#### 6.5. Aspectos técnicos a tener en cuenta para la correcta manipulación del aplicativo.

Como se ha mencionado a continuación las variables de entrada para realizar el estudio de arco dentro de la subestación POLY I son:

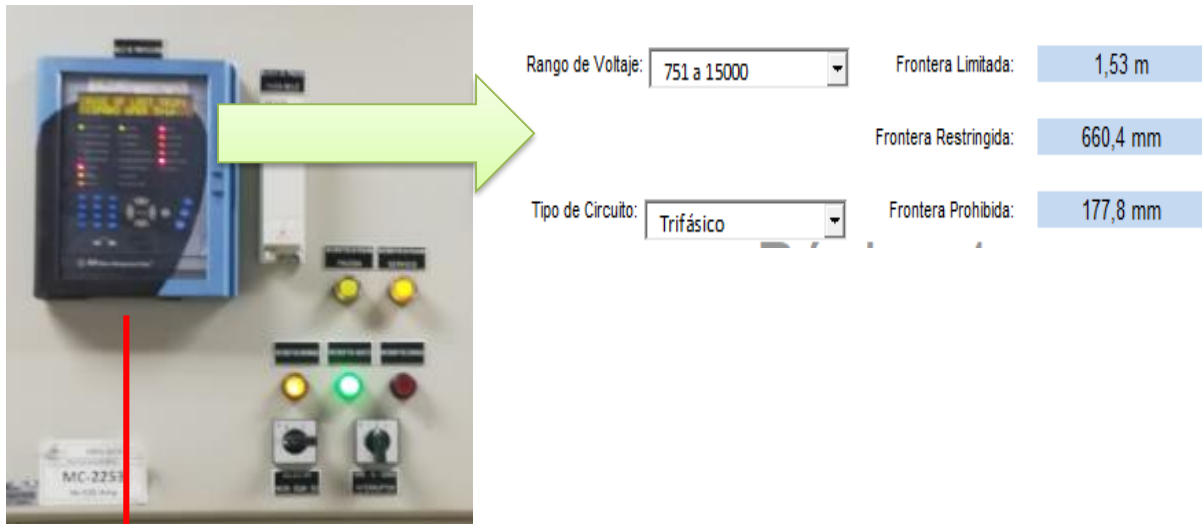
- Tensión de red.
- Tipo de red.
- Impedancia.
- Distancia entre electrodos.
- Tiempo de despeje de la falla.
- Potencia aparente del transformador.

#### **6.5.1 Obtener y cargar datos de tensión de red de sistema en aplicativo computacional.**

Para obtener la tensión de red en la subestación POLY I los tableros cuentan con una serie de equipos de medida como los indicados en la figura 39, es importante señalar que esta medida será el promedio de las tres fases en una red trifásica. Con esta información se obtiene datos importantes como fronteras de aproximación (ver figura 40) y elementos de protección como guantes y casco.

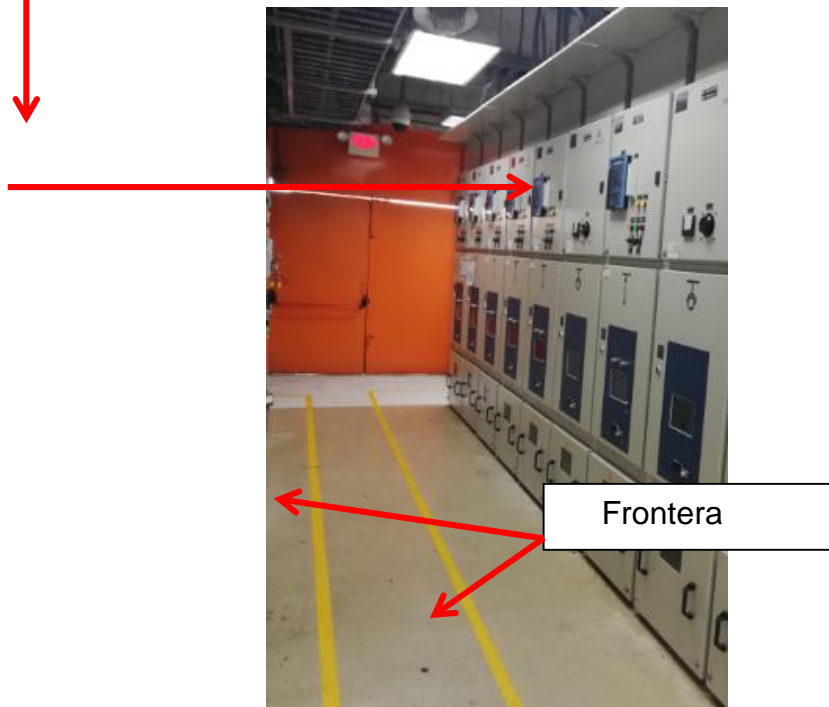
**Figura 40.**

*Datos de tensión de red.*



**Figura 41.**

Frontera limitada en subestación POLY I.



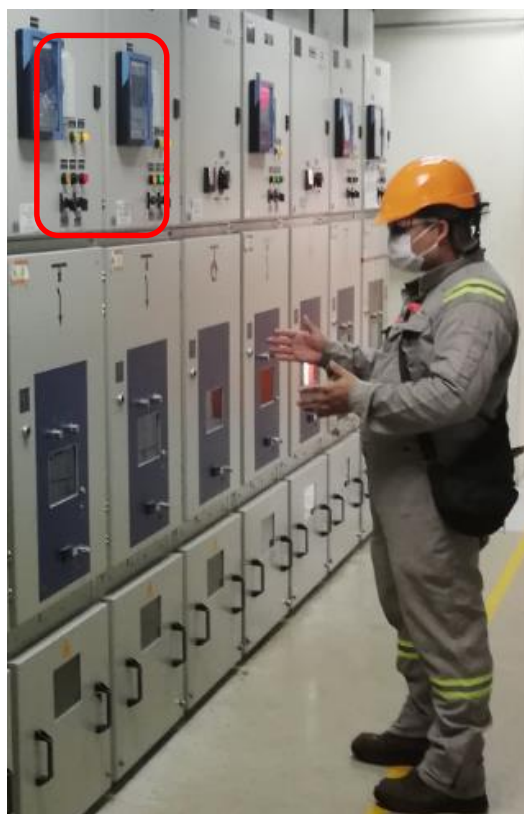
**Nota.** Imágenes de datos de tensión de red y fronteras limitadas de la subestación POLY I

**6.6. Obtener y cargar datos impedancia, distancia entre electrodos, tiempo de despeje de la falla y potencia de TRF.**

Para obtener el tiempo de despeje de la falla es necesario recurrir a las curvas de disparo de los interruptores (ver figura 41) e ingeniería de detalle del sistema de protección del transformador.

**Figura 42.**

*Información de curvas de disparo.*

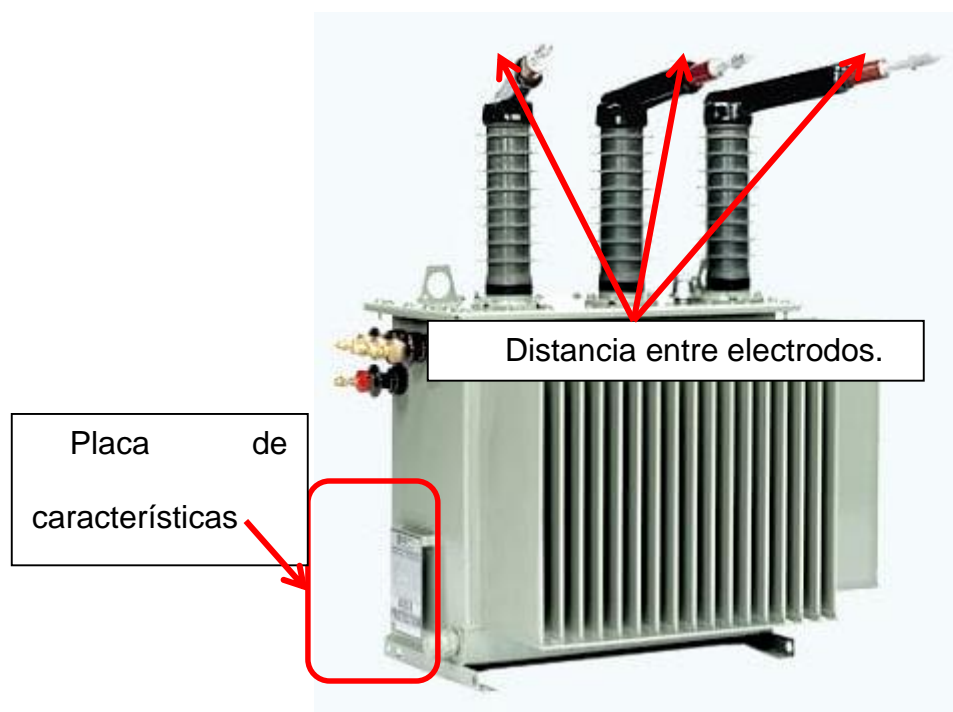


**Nota.** Imagen de la toma de curvas de disparo

Para el caso de la distancia entre electrodos en el transformador se hace referencia a la separación que existe entre los terminales del lado de alta como se observa en la figura 42, este valor y la impedancia son entregados en la placa del TRF.

**Figura 42.**

*Distancia entre electrodos de un TRF.*



**Nota:** Transformador de patio. Recuperado de <httpswww.directindustry.esprodcg-power-systemsproduct-13988-1716583.html>

## 7. Conclusiones

La subestación POLY I de la refinería Barrancabermeja cuenta con cinco sistemas que son transformadores de media tensión y doce subsistemas que son protecciones o interruptores encargados de proteger los transformadores y motores derivados de la subestación, de esta forma se establece que los datos de entrada para realizar el estudio de arco son tensión de red, impedancia del transformador, corriente de cortocircuito, tipo de circuito (monofásico, bifásico, trifásico), distancia entre electrodos y tiempo de despeje de la falla.

El aplicativo computacional desarrollado al tomar como referencia el transformador TRF148D se determina que las fronteras de aproximación son limitada 1,53m restringida 660,4mm y prohibida 177,8mm, en cuanto a los EPP los guantes deben ser clase 1 y el caso clase B, finalmente la energía incidente es de  $3,24\text{cal/cm}^2$  y cortocircuito 3,35kA.

Finalmente, el manual de usuario que ha sido desarrollado deja una guía práctica que permite establecer los requisitos de entrenamiento del personal electricista, establece prácticas de seguridad, indica las reglas de oro en trabajos con electricidad, indica los requerimientos básicos para la aplicación de bloqueo y tarjeteo, indica cómo se debe realizar la configuración de macros de Microsoft Excel e indica aspectos técnicos para manipular correctamente el aplicativo desarrollado.

### Referencias Bibliográficas

- Llanera M. Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo. Edición 2009. Editorial OBERON. 35p.
- Maldonado, F. (2013). Estructuración de un programa de mantenimiento básico de equipos rotativos para ser ejecutado por personal de operaciones de las plantas de parafinas y servicios industriales de la refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol. Barrancabermeja: UIS.
- Mohamed A. (2002). Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. [En línea]. [7 octubre de 2020]. Disponible en [https://www.bu.edu.eg/portal/uploads/Engineering,%20Shoubra/Electrical%20Engineering/2904/crs10562/Files/mohamed%20abd%20elwahab%20ali\\_Lecture%2007.%20IEEE%201584%20Arc%20Flash%20Calculations.pdf](https://www.bu.edu.eg/portal/uploads/Engineering,%20Shoubra/Electrical%20Engineering/2904/crs10562/Files/mohamed%20abd%20elwahab%20ali_Lecture%2007.%20IEEE%201584%20Arc%20Flash%20Calculations.pdf)
- Neitzel, D. Handbook for Electrical Safety in the Workplace. Tercera Edición. Editorial MacGraw Hill, 2006, p24-26.
- Normatividad legal [en línea]. [Citado 28 Marzo 2020]. Disponible en internet <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/responsabilidad-corporativa/gobierno-corporativo/normatividad>
- Puerto V. (2014). Accidente en tablero de refinería Barrancabermeja. [En línea]. [7 octubre de 2020]. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=lm2HHoqaBTo>

Trejo, José (2013) *Comparación de la Norma NFPA 70E y la IEEE 1584 – 2002 para el análisis del arco eléctrico para el uso adecuado del equipo de protección*. Tesis para optar el título de Ingeniero Electricista. Instituto Politécnico Nacional, México.

Valbuena, A. Caracterización de las electrocuciones en Colombia, Bogotá, (2016). 34p. Trabajo de grado Especialista en medicina forense. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de medicina.

Yupanqui, A. (2018). Determinación y evaluación del arco eléctrico (ARC FLASH) para la implementación de procedimientos y de seguridad del personal que labora en el área eléctrica de una planta de cobre. Universidad Nacional de san Agustín de Arequipa, Perú.