

**OPTIMIZACIÓN Y CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE POTENCIA ELÉCTRICA  
DE LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS**

**ALEJANDRO URIBE NARANJO  
OMAR STALIN GONZÁLEZ PRADO  
EDWARD ALEXANDER GIRALDO**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO – IUPB  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
MEDELLÍN  
2014**

**OPTIMIZACIÓN Y CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE POTENCIA ELÉCTRICA  
DE LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS.**

**ALEJANDRO URIBE NARANJO  
OMAR STALIN GONZÁLEZ PRADO  
EDWARD ALEXANDER GIRALDO**

**Decano**

**ING. BYRON ÁLVAREZ**

**Jefe De Carrera**

**ING. LUIS GIOVANNY BERRIO Z.**

**Asesor de Proyecto**

**EDGAR A. RENDÓN PALACIO**

**Proyecto de Emprendimiento presentado como requisito para optar  
al Título de Ingeniero Electricista**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO – IUPB  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
MEDELLÍN – ANTIOQUÍA – COLOMBIA  
MAYO 2014**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del Jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Medellín, 30 Mayo de 2014**

## DEDICATORIAS

*Gracias a Dios, a mi familia, amigos y docentes que me apoyaron constantemente en mi andar hasta alcanzar una meta más de las muchas que me he trazado.*

*Alejandro Uribe Naranjo*

*El presente proyecto se lo dedico principalmente a Dios, a mis padres, mis hermanos e igualmente a mis abuelitos. A mis profesores y amigos. Y los demás familiares que me apoyaron constantemente en la realización de mis estudios.*

*Omar Stalin González Prado*

*Principalmente a Dios ya que gracias a él he alcanzado este gran logro. A mis padres y que siempre han sido mi soporte y mi inspiración. A mis hermanos que me han apoyado en todo el momento. A mis compañeros de tesis que influyeron en gran manera en mi formación como persona y profesional. Finalmente gracias a todas las personas que siempre estuvieron apoyándome.*

*Edward Alexander Giraldo*

## AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Mecánico **Froilán J. Salcedo B.**, de la *UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA* y compañero de labor, por el tiempo de dedicación y acompañamiento en asesorar en nuestros cálculos del proyecto.

Al Ingeniero electricista y magíster **Edgar A. Rendón Palacio**, asesor interno del proyecto y docente de ingeniería eléctrica de la Institución Universitaria *PASCUAL BRAVO*.

Al Ingeniero electricista **Byron Álvarez**, Decano de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Institución Universitaria *PASCUAL BRAVO*.

Al Ingeniero electricista **Luis Giovanny Berrio Z.**, Docente y jefe del programa de ingeniería eléctrica de la Institución Universitaria *PASCUAL BRAVO*.

Gracias por la gran colaboración y apoyo constante en la realización de nuestros trabajos.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
SÍMBOLOS, ABREVIATURAS Y NOMENCLATURAS .....	15
RESUMEN.....	20
INTRODUCCIÓN.....	24
1. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	25
2. JUSTIFICACIÓN .....	27
3. OBJETIVOS.....	28
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	28
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	28
4. ESTADO DEL ARTE EN EL DESARROLLO DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS EN MEDIA TENSIÓN. ....	29
4.1 CELDAS DE MEDIA TENSIÓN.....	30
4.2 CLASIFICACIÓN DE ARCO ELÉCTRICO. ....	31
4.3 INTERRUPTORES DE VACÍO.....	32
4.4 RELÉS DE PROTECCIÓN.....	35
5. METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN PARA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO.....	37
5.1 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO.....	38
5.2 CÁLCULOS TÉCNICOS DEL PROYECTO.....	41
5.2.1 Consideraciones para el sistema.....	41
5.2.2 Análisis de la distribución de demanda en las cargas del sistema.....	42
5.2.3 Distribución de las cargas del flujo eléctrico en las diez subestaciones.....	44
5.2.4 Determinación de niveles de cortocircuito para la subestación principal.....	47
5.2.5 Determinación de protecciones para la subestación principal. ....	55

5.2.6	59
6.	72
6.1	72
6.1.1.	74
6.1.2.	76
6.2.	77
6.3.	78
6.3.1.	78
6.3.2.	80
6.3.3.	80
6.3.4.	81
6.4.	82
6.4.1.	82
6.4.2.	84
6.5.	85
6.6.	86
6.7.	89
6.8.	90
7.	92
7.1.	92
7.2.	92
7.3.	92
8.	93

9.	REFERENCIAS.....	96
9.1.	Bibliográficas.....	96
9.2.	Infografías, Cibergráficas y páginas web.....	97
10.	ANEXOS.....	98
	SISTEMA DE UNIDADES.....	119



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Tendencia mundial del SF <sub>6</sub> vs la tecnología de vacío. [04] .....	33
Figura 2: Diagrama unifilar de la subestación principal, ver anexos. [01] .....	40
Figura 3: Demanda y consumo de energía en la subestación principal. [01].....	43
Figura 4: Diagrama unifilar de la S/E principal. [01] .....	44
Figura 5: Diagrama unifilar de la red del transformador de MT N°1A alimenta a las subestaciones 2, 3, 4, 7, 8 y 9. [01] .....	45
Figura 6: Diagrama unifilar de la red del transformador de MT N°1B alimenta a las subestaciones 5, 6 y 10. [01].....	46
Figura 7: Protección de un circuito por interruptor automático. [04]. .....	56
Figura 8: Condiciones máxima y mínima para protecciones. [04] .....	58
Figura 9: Curvas características de tiempo vs intensidad para los relés de protección FP5000 y EDR3000. [04].....	59
Figura 10. Curva de disparo – Grupo 1 – Relé W-Vaci-25 de protección Principal.....	61
Figura 11. Curva de disparo – Grupo 2 – Relé W-Vaci-25 de protección Principal.....	62
Figura 12. Curvas de capacidades para fusibles. ....	63
Figura 13. Curva ANSI para transformadores .....	65
Figura 14. Curvas de daño e Inrush del transformador. ....	65
Figura 15. Curvas de daño e Inrush de los transformador con el Fusible.....	66
Figura 16. Unifilar completo con las protecciones de la subestación principal. ....	71
Figura 17: Celdas “Power Xpert UX”. [01] .....	73
Figura 18: Compartimiento de bajo voltaje. [01].....	74
Figura 19: Mecanismos de Inserción de interruptor – Desde el carro. [01].....	75
Figura 20: Mecanismo de conexión del interruptor – Con la puerta cerrada. [01] .....	76

Figura 21: Extracción de bandeja del interruptor. [01] .....	77
Figura 22: Elementos de mando y señalización, Celdas J y K. [01] .....	79
Figura 23: EDR-3000 - Elementos de Monitoreo y Reconocimiento de Fallas. [01] .....	83
Figura 24: FP4000/FP5000 - Elementos de Monitoreo y Reconocimiento de Fallas. [01] .....	83
Figura 25: Conexión de TPs en Celda de Medida (Analizadores ELSPEC). [01] .....	85
Figura 26. Mecanismo de Apertura/Cierre seccionador de tierra. [01] .....	86
Figura 27. Enclavamiento de seguridad en la puerta del interruptor. [01].....	87
Figura 28. Enclavamientos de seguridad para la inserción del interruptor. [01].....	87
Figura 29. Enclavamiento mecánico – Seccionador de tierra abierto. [01].....	88
Figura 30. Enclavamiento mecánico – Puerta inferior abierta. [01] .....	88
Figura 31: Descripción Componentes Consola Remota. [01] .....	89
Figura 32. Arquitectura de comunicación. [01]. .....	91

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparativo entre Seccionadores SF <sub>6</sub> e Interruptores de Vacío. ....	34
Tabla 2: Demanda de energía en las subestaciones de la industria. ....	43
Tabla 3: Características de los transformadores N°1A y N°1B. ....	48
Tabla 4: Perdidas en los transformadores en aceite a 13,2 kV ....	49
Tabla 5: Perdidas en los transformadores en secos a 13,2 kV ....	49
Tabla 6: Perdidas en los transformadores en aceite a 44,0 kV ....	49
Tabla 7: Parámetros de red de baja tensión, Industria de Alimentos. ....	51
Tabla 8: Resultados de cálculo de cortocircuito por puntos de red. ....	52
Tabla 9: Resultados de cálculo por alimentación de transformadores en paralelo. ....	53
Tabla 10: Resultados de cálculos por alimentación individual de cada transformador. ....	54
Tabla 11: Categoría de transformador. ....	64
Tabla 12: Datos de los circuitos de alimentación primaria. ....	67
Tabla 13: Criterios de ajuste de protecciones de sobrecorriente. ....	68

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 001: Diagrama unifilar detallado de la subestación principal de la Industria de Alimentos. ....	101
Figura 002: Diagrama unifilar del centro de distribución de las celdas de transferencias automáticas en la Subestación Principal MT de la Industria de Alimentos.....	102
Figura 003: Diagrama unifilar de las celdas de transferencias AFB, de la Industria de Alimentos. ....	103
Figura 004: Distribución de las cargas y demanda del flujo eléctrico en las diez subestaciones, de la Industria de Alimentos. ....	104
Figura 005: Las características del sistema ELSPEC - Industria de Alimentos. <b>SOFTWARE ELSPEC G4420</b> .....	105
Figura 006: Los análisis y mediciones que ofrece el sistema ELSPEC - Industria de Alimentos. ....	106
Figura 007: Los análisis y mediciones que ofrece el sistema ELSPEC - Industria de Alimentos. ....	107
Figura 008: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC en la subestaciones - Industria de Alimentos.....	108
Figura 009: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC en la subestaciones - Industria de Alimentos.....	109
Figura 010: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC en la subestaciones - Industria de Alimentos.....	110
Figura 011: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC en la subestaciones - Industria de Alimentos.....	111
Figura 012: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC INVESTIGATOR en la subestaciones - Industria de Alimentos.....	112
Figura 013: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC INVESTIGATOR en la subestaciones - Industria de Alimentos.....	113

Figura 014: Los transformadores de la subestación principal - Industria de Alimentos.....	114
Figura 015: El centro de distribución de potencia eléctrica y el control automático. - Industria de Alimentos. ....	115
Figura 016: Los dos medidores del sistema ELSPEC de la subestación principal. - Industria de Alimentos. ....	116
Figura 017: El control automático de la subestación principal. - Industria de Alimentos.....	117
Figura 018: Equipos para el control automático de la subestación principal. - Industria de Alimentos. ....	118

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 001. DATOS TÉCNICOS DE LOS TRANSFORMADORES DE LAS DIEZ SUBESTACIONES - Industria de Alimentos. 2013. ....	100
Tabla 002: Simbología de magnitudes y unidades utilizadas en electrotecnia. ...	119

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Datos Técnicos De Los Transformadores De Las Diez Subestaciones .....	99
Anexo B. Diagrama Unifilar De La Subestación Principal De La Industria De Alimentos.....	101
Anexo C. Centro De Distribución De Las Celdas De Transferencias Automáticas En La Subestación Principal.....	102
.Anexo D. DIAGRAMA UNIFILAR DE LAS CELDAS DE TRANSFERENCIAS AFB. ....	103
Anexo E. Distribución De Las Cargas Del Flujo Eléctrico En Las Diez Subestaciones. ....	104
Anexo F. Sistema de Gestión de la Calidad de Energía <b>Software Elspec</b> ....	105
Anexo G. <b>Software Elspec G4420</b> .....	106
Anexo H. Resumen De Mediciones Promedio De Voltajes, Corrientes Y Factor De Potencia De Algunas Subestaciones.....	108
Anexo I. Demanda Y Consumo De Energía En Las Subestaciones.....	109
Anexo J. Transformadores De La Subestación Principal .....	114
Anexo K. Centro De Distribución De Potencia Eléctrica Y El Control Automático.....	115
Anexo L. Los Medidores Del Sistema Elspec.....	116
Anexo M. Consola Remota O Control Automático En La Subestación Principal.....	117
Anexo N. Equipos Para Las Operaciones En Las Celdas “Power Xpert Ux”....	118

## SÍMBOLOS, ABREVIATURAS Y NOMENCLATURAS

### SÍMBOLOS ELÉCTRICOS

Estos símbolos son de obligatoria aplicación los símbolos gráficos contemplados en el RETIE en la Tabla 6.1, estas son tomadas de las normas unificadas IEC 60617, ANSI Y32, CSA Z99 e IEEE 315, los cuales guardan mayor relación con la seguridad eléctrica. [02].

Cuando un término no aparezca, se recomienda consultar las normas IEC serie 50 ó IEEE 100. [02].

### ABREVIATURAS.

AT: Alta Tensión.

ANSI: American National Standards Institute.

AWG: American Wire Gage.

BT: Baja Tensión.

CA: Corriente Alterna.

CD: Corriente Directa.

CC: Cortocircuito.

CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas.

DP: Dispositivo de Potencial.

DPS: Dispositivo de Protección contra Sobretensiones Transitorias.

Hz: Hertz.

$I_{RMS}$ : Valor eficaz de la corriente.



IEC o CEI: Comisión Electrotécnica Internacional.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

MPa: Mega pascales.

MVA: Mega Volts Amperes.

MVAr: Mega Volts Amperes reactivos.

msnm: Metros sobre nivel del mar.

MT: Media tensión.

NC: Normalmente cerrado.

NO: Normalmente abierto.

NTC: Norma Técnica Colombiana.

NEMA: Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos.

OPLAT: Onda Portadora en Línea de Alta Tensión.

ONAN (OA): Aceite Natural - Aire Natural.

ONAF (FA): Aceite Natural - Aire Forzado.

OFAF (FAO): Aceite forzado - Aire Forzado.

ODAF (FOA): Aceite Dirigido - Aire Forzado.

PVC: Polivinilo de Cloruro.

$P_{\text{TRAFO}}$ : Potencia del transformador.

$P_{\text{Cu}}$ : Pérdidas en el cobre.

$P_{Fe}$ : Pérdidas en el hierro.

$P_{pc}$ : Pérdidas a plena carga.

$P_0$ : Pérdidas en vacío.

$R_i$ : Resistencia de la fuente de alimentación.

RETIE: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, adoptado por Colombia.

S/E: Subestación Eléctrica.

$SF_6$ : Hexafluoruro de Azufre.

SI: Sistema Internacional de unidades.

TC: Transformador de Corriente.

TP: Transformador de Potencial.

TRAFO: Transformador de Potencia.

kA: Kilo Amperios.

kVA: Kilo Voltios Amperios.

kV: Kilo Voltios.

$V_{CA}$ : Volts corriente alterna.

$V_{CD}$ : Volts corriente directa.

$V_{RMS}$ : Valor eficaz del voltaje.

UPME: Unidad de Planeación Minero Energética.

RMS: Root Mean Square. "Raíz media cuadrada" valor eficaz de medida.

$X_i$ : Reactancia de la fuente de alimentación.

XLPE: Conductor con aislamiento seco de polietileno reticulado.

W: Watts.

$Z_{1A}$ : Impedancia del transformador existente.

$Z_{1B}$ : Impedancia del transformador nuevo.

### **NOMENCLATURAS.**

[01], [02], [...]: Referencias bibliográficas.

[01W], [02W], [...]: Referencias de Infografías, Cibergráficas y páginas web.

01, 02,...: Referencias para la numeración de las tablas y figuras.

001, 002,...: Referencias para la numeración de las tablas y figuras en el anexo.

## RESUMEN

El presente proyecto de ingeniería se plantea la optimización del sistema de alimentación de energía eléctrica para las diez subestaciones existentes en la planta de producción, cumpliendo con la normatividad de la NTC 2050 y el RETIE, con el objetivo que el sistema cumpla con las necesidades de seguridad, confiabilidad, mantenibilidad y flexibilidad en el manejo de las tres fuentes de alimentación y la distribución de la energía eléctrica para las subestaciones secundarias, mejorando los elementos de control para hacer lo más fácil posible la operación, con la capacidad de trabajar desde un control automático para un circuito principal de 44,0 kV y otro secundario de 13,2 kV y/o un circuito de emergencia representado en un grupo electrógeno de 1,1 MVA este grupo tiene un transformador elevador de 440 Vac a 13,2 kV, con el cual se permite obtener una excelente continuidad en los procesos productivos dentro de la planta.

Se cuenta con un transformador existente y uno nuevo ambos de la misma capacidad de 3,5 MVA y a la misma tensión, permitiendo la capacidad de alimentar la carga total con tres posibilidades de conexión a las cargas.

- Alimentación a los dos grupos de subestaciones con cada transformador independientemente.
- Alimentación a los dos grupos de subestaciones con los dos transformadores en paralelo sincronizado.
- Alimentación a los dos grupos de subestaciones con uno u el otro transformador.

Las características de las **curvas de daño y corriente Inrush** del transformador adquirido con la norma NTC 2797, son utilizados para la configuración de los transformadores de medidas y según el análisis de cargabilidad de la planta, con posibilidad de ajustar la corriente nominal para las protecciones del sistema de la subestación principal.

Se logra la optimización del sistema implementando un nuevo transformador de característica de ahorro de energía, haciendo una redistribución de las cargas conectas, mejorando el sistema de protección y el sistema de control automático. Las protecciones para las cargas interconectadas se hicieron con los ajustes adecuados de los relés de protección de cada interruptor en el centro de distribución de potencia eléctrica dentro a los límites previstos, donde los relés de protección pueden ser usados para dar características sofisticadas a los interruptores de vacío, incluyendo la precisión en la calibración de los niveles de protección por corriente o voltaje, además de la visualización para monitoreo y comunicación industrial con sistemas de control supervisorio y adquisición de datos.

La implementación y el montaje de la nueva subestación principal fueron realizados por la firma de ingenieros "OMC S.A." con el aval y la auditoría de los ingenieros de la Industria de Alimentos.

**Palabras claves:** Optimización, subestación, seguridad, confiabilidad, mantenibilidad, flexibilidad, control automático, capacidad, electrógeno, transformador, continuidad, productivos, protección, interruptor, corriente y voltaje.

## ABSTRACT

This project engineering system optimization power of electricity for ten existing substations in the production plant, complying with the standards of IEC 2050 and RETIE, in order that the system meets the needs arises safety, reliability, maintainability and flexibility in the management of the three sources of supply and distribution of electricity for secondary substations, improving the control elements to make it as easy as possible to operate, with the ability to work from a control automatic for a primary circuit 44,0 kV and a secondary of 13,2 kV and/or an emergency circuit in a generator represented 1,1 MVA transformer this group has a lift of 440 Vac to 13,2 kV, with which obtains excellent continuity in production processes within the plant.

It has an existing transformer and new one both in the same capacity of 3.5 MVA and the same voltage, allowing the ability to feed the total load with three possibilities for connecting loads.

- Power to the two groups with each transformer substation independently.
- Power to the two groups of substations with two transformers in parallel synchronized.
- Power to the two groups of substations with one or the other transformer.

The characteristics of the damage curves and current Inrush transformer purchased with the NTC 2797 standard are used for configuring processors measurements and by analysis of chargeability of the plant, with the possibility of adjusting the nominal current for the protection of the main substation system.

System optimization is achieved by implementing a new transformer energy saving feature, causing a redistribution of loads connect, improving protection system and automatic control system. Protections for interconnected loads were made with appropriate settings of protection relays each switch in the center of distribution of electric power within the indicated range, where the protection relays can be used to provide sophisticated features to switches vacuum, including the calibration

accuracy of the levels of protection by current or voltage, plus monitoring display for industrial communication systems and supervisory control and data acquisition.

The implementation and installation of the new main substation were conducted by the engineering firm “OMC S.A.” with the approval and audit of the engineers of the Food Industry.

**Keywords:** Optimization, substation, safety, reliability, maintainability, flexibility, automatic control, capacity, generator, transformer, continuity, production, protection, switch current and voltage.

## INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se diseña un sistema de alimentación del fluido eléctrico a la planta de la Industria de Alimentos, que cumpla con el código de instalaciones eléctricas RETIE y que cumpla con las exigencias de operación, mantenibilidad, confiabilidad, seguridad, y que pueda trabajar automáticamente desde un centro de control de distribución de potencia eléctrica, en el cual se pueda garantizar la operación y la continuidad de los procesos productivos dentro y afuera de la planta.

Se admite durante la etapa de planificación preliminar del sistema, antes de la selección de los equipos de distribución, varios sistemas de distribución deben ser analizados y evaluados, incluyendo factores técnicos y económicos. Durante esta etapa, si el tamaño del sistema y/o su complejidad se justifican, puede ser apropiado para realizar una revisión a fondo de cada sistema tanto en condiciones normales como en condiciones anormales.

Además la industria deberá tener el pleno conocimiento de las leyes físicas que regulan la electricidad ya que en los dos últimos siglos ha permitido grandes avances tecnológicos y una alta dependencia de esta forma de energía, por cual cumplir normas como:

*“Y en cumplimiento del artículo 2° de la Constitución Nacional, les corresponde a las autoridades de la República proteger a todas las personas residentes en Colombia en su vida, honra y bienes. En tal sentido el Ministerio de Minas y Energía como máxima autoridad en materia energética,... ”. [02]<sup>1</sup>.*

---

<sup>1</sup> Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, pág. 8.



## 1. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se realizará la optimización del sistema de distribución de energía eléctrica que garantice la confiabilidad de los equipos en planta y la flexibilidad al del sistemas de potencia eléctrica, con lo cual se propone suplir el crecimiento de la demanda energética de la empresa proyectada a 10 años; esta iniciativa tiene su historial con base a mediciones realizadas en el sistema de potencia anterior que diagnostica una demanda de 2,9 MVA y con la proyección expedida de varios equipos nuevos en planta habrá un crecimiento entre 0,6 y 0,8 MVA, por el cual dejaría al sistema en su límite de capacidad, siendo este vulnerable a posibles fallos del sistema, debido a que la capacidad de potencia actual del sistema es de 3,5 MVA.

A partir de esta oportunidad se diseña un sistema de potencia eléctrica para la distribución de cargas que se instalaron en la planta proyectada a futuro, que cumplan con las necesidades de seguridad, confiabilidad, mantenibilidad y flexibilidad en la operación con la capacidad de trabajar desde un control automático en un circuito principal de alimentación de 44,0 kV y otro de 13,2 kV y/o un circuito de emergencia de 1,1 MVA representado en un grupo electrógeno, el cual se permite obtener una continuidad en los procesos. Por consiguiente fue necesario implementar dos circuitos que agruparan las diez subestaciones secundarias con el fin de optimizar y/o evitar un paro total en toda la planta por cualquier falla en una de estas subestaciones conectadas a la red de media tensión.

Se implementaron varios grupos de interruptores en vacío con unas propiedades como son el material aislante, la alta rigidez dieléctrica y la extinción de arco eléctrico lo cual tiene una mayor confiabilidad para disminuir el impacto que se genera en el caso de una falla eléctrica a través de estas nuevas tecnologías para la optimización.

Se disminuye el riesgo de una posible contaminación con Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) por la selección de nuevos equipos que operan en vacío.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta la creciente y acelerada evolución de las empresas, el aumento del consumo de sus productos en altos volúmenes, y además conscientes de que los competidores pueden ofrecer buenos productos a precios atractivos para el consumidor. Lo anterior se convierte en una oportunidad para la Industria de Alimentos, de replantear la capacidad del proceso productivo para los próximos diez años.

Para garantizar la confiabilidad del sistema de suministro de potencia eléctrica según el estudio en este proyecto se realizará la implementación de un sistema de distribución óptimo que permita suplir la demanda que se proyecta hoy y en los próximos diez años.

Mejorar la seguridad en los riegos de la operación en los equipos de media tensión con tecnología de vacío, evitando el escape de gas Hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) al medio ambiente y aumentar la confiabilidad en la distribución del fluido eléctrico en la planta.

Esto quiere decir que se reevaluará la situación actual de la carga eléctrica instalada, para luego definir y dimensionar los nuevos equipos del centro de carga que logren optimizar y/o cubrir eléctricamente las nuevas capacidades de producción en la planta.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Optimizar el sistema de potencia eléctrica implementando nuevas tecnologías en la Industria de Alimentos, con el fin de soportar el crecimiento energético presupuestado para los próximos diez años.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la capacidad instalada del sistema de potencia eléctrico en la Industria de Alimentos.
- Diseñar un nuevo sistema de potencia eléctrico en la Industria de Alimentos, de tal forma que satisfaga las nuevas cargas instaladas en la planta.
- Implementar un nuevo sistema de potencia eléctrico, para la optimización de los tiempos de operación en la entrega de la potencia eléctrica y que satisfaga el crecimiento energético en los procesos productivo en la planta.

#### **4. ESTADO DEL ARTE EN EL DESARROLLO DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS EN MEDIA TENSIÓN**

Como los procesos productivos de las grandes empresas son tan vastos, estas necesitan garantizarlos de tal forma que sean productivos, continuos y además confiables, con el fin de optimizar los procesos y los recursos. Los recursos energéticos juegan un papel fundamental en las industrias, pues son los encargados de suministrar y generar la energía necesaria en la transformación del producto.

En el desarrollo de este trabajo de ingeniería se plantea la aplicación de nuevas tecnologías para una mayor confiabilidad del sistema de potencia eléctrica de la Industria de Alimentos, con el cual se reestructura el sistema principal de distribución de energía eléctrica, con el objetivo de sostener la demanda de energía eléctrica de los nuevos equipos adicionados al proceso productivo en los próximos diez años.

Se fijarán las condiciones mínimas y puntuales que deben cumplir las subestaciones de media tensión a 44,0 kV y 13,2 kV que se diseñen y construyan en el área de influencia de la Industria de Alimentos. Estas instalaciones acatarán todas las disposiciones contenidas en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, RETIE, en especial el Capítulo: "REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN (SUBESTACIONES)", y la NTC 2050 Sección 450. Las redes y las subestaciones a nivel 3 o de media tensión, se regirán por las disposiciones de la CREG y de la UPME. [02].

La NTC 2050 en el artículo 450-45, fija el área mínima requerida para la ventilación de los transformadores. [02].

Respecto a las tecnologías emergentes en la implementación de sistemas de distribución se encuentran normas y estándares que se deben adoptar para respaldar el desarrollo de proyectos de optimización en subestaciones eléctricas.

Actualmente se involucran diversas tecnologías para la extinción del arco eléctrico y sus respectivos complementos para la protección del personal operativo de los cuartos de distribución eléctrica conocidos como equipos de protección personal (PPE). La extinción de arco eléctrico puede clasificarse para obtener diferentes configuraciones de protección, de este modo el nivel de protección personal puede simplificarse según el modo de operación, y especialmente para proteger al personal en modos de mantenimiento habilitados en los cuales el sistema de protección eléctrica actúa con mayor rapidez que en modos de operación normal, lo cual reduce el nivel de energía incidente generada según el nivel de falla [04].

#### **4.1 CELDAS DE MEDIA TENSIÓN**

Las celdas de media tensión, también denominadas cuadros, paneles, consolas o armarios, deben cumplir los requisitos de una norma técnica internacional, tal como IEC 62271-1, IEC 62271-200, de reconocimiento internacional como la UL 347, ANSI - IEEE C37 o NTC que le aplique y demostrarlo mediante un certificado de conformidad de producto. [01]

##### **Normas aplicables. [03]**

Los interruptores y sus accesorios serán diseñados, fabricados y probados de acuerdo a las últimas versiones vigentes de las normas NEMA, ANSI, IEC y otras.

Los interruptores deben cumplir las siguientes normas:

- IEC 60060: “Técnicas de prueba de alta tensión”.
- IEC 60427: “Prueba sintética de alta tensión alterna de los interruptores diferenciales”.

- IEC 60694: “Especificaciones comunes para conmutación de alta tensión y las normas de alimentación incorporadas”.
- IEC 61264: “Cerámica presurizado aisladores huecos de conmutación de alta tensión y de mando”.
- IEC 62271-100: “Alto voltaje alterno de los interruptores diferenciales”.
- IEC 62271-200: “División de compartimientos en función de las características constructivas”, distinción basada en la funcionalidad orientada a los mantenimientos en compartimientos principalmente en sistemas extraíbles. Introduce la clasificación de arco interno para proporcionar protección a las personas en condiciones normales de operación.

## **4.2 CLASIFICACIÓN DE ARCO ELÉCTRICO.**

El diseño de un sistema de protección eléctrica requiere definir el nivel de riesgo de ocurrencia de una falla según la ocurrencia de eventos y la severidad asociada con cada cual. Al aplicar acciones para reducción de riesgo se deposita la responsabilidad sobre el diseñador que es el encargado de seleccionar un nivel tolerable de riesgo. Una falla de arco eléctrico puede ocurrir por error humano, polución excesiva, degradación de los medios aislantes, sobretensiones debido a descargas atmosféricas. Existen diferentes causales de arco interno clasificados según los sitios de mayor probabilidad de ocurrencia de una falla interna:

- Compartimiento de cables: sucedido por diseño o instalación inadecuados de materiales, o por fallas de aislamiento.
- Seccionadores (puesta a tierra): causado por operación indebida sin tener en cuenta los enclavamientos de seguridad presentes.
- Contactos y conexiones atornilladas: debido a corrosión o montaje inadecuado.
- Transformadores de medida: ocurrido por cortocircuito en el lado de baja tensión, o por ferro resonancia.

- Interruptores: ocasionado por mantenimiento insuficiente.

La norma IEC 62271-200 establece varios criterios importantes que permiten dar la clasificación de arco interno a una celda de media tensión, en el momento de ocurrencia de fallas de arco eléctrico, como sigue:

- No deben abrirse puertas y tapas.
- No deben desprenderse partes del tablero.
- No deberán producirse aberturas o perforaciones luego del arco.
- Los indicadores no deberán incinerarse.
- Todas las conexiones de tierra son eficaces.

### **4.3 INTERRUPTORES DE VACÍO**

El interruptor de vacío permite optimizar el nivel de protección de corto circuito, siendo totalmente eficaces para el rango de voltaje definido (Factor  $K=1$ ) por el fabricante, lo cual proporciona confiabilidad para interrumpir fallas de corto circuito, manteniendo una referencia definida, sin importar el nivel de tensión de operación presente en la falla [04]. La investigación en la tecnología de vacío ha tenido mucha acogida a nivel industrial desde los años 30 cuando se inició la primera investigación de arco eléctrico en vacío, para la producción del primer interruptor en vacío en 1967 por Westinghouse, En 2005 se desarrolla el primer interruptor con capacidad de 80 kA.

La interrupción en vacío constituye la función de desenergizar circuitos en corriente alterna separando un juego de contactos ubicados en una cámara en vacío, la corriente se corta al primer cruce por cero o antes. La rigidez dieléctrica entre los contactos aumenta en razón de miles de veces mayor a la de un interruptor convencional (1,0 kV/ $\mu$ s para 100 A en comparación con 50 V/ $\mu$ s para el aire). La capacidad dieléctrica del vacío permite una distancia entre los contactos de 6 a 25 mm en posición abierto. Este tipo de interruptores tienen

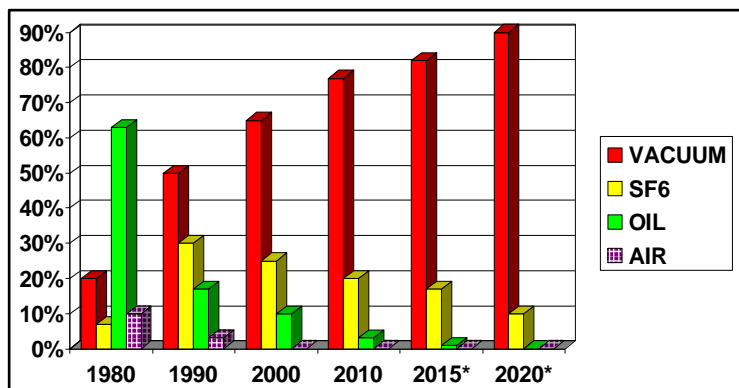


aplicación en voltajes medios hasta 38 kV, su mantenimiento es mínimo y tienen larga vida de operación (30000 interrupciones a corriente nominal, 100 de corto circuito).

En la

*Figura 1* se observa la tendencia mundial en el uso de tecnología de vacío, SF<sub>6</sub>, entre otros. Lo cual se ve respaldado con las justificaciones ambientales contenidas en los interruptores de vacío, su robustez mecánica y eléctrica, poder de corte y medio de extinción de arco.

Figura 1: Tendencia mundial del SF<sub>6</sub> vs la tecnología de vacío. [04]



Fuente: Documentación y software de EATON.

Para tener mayor claridad sobre las ventajas que tiene la tecnología de vacío sobre los seccionadores SF<sub>6</sub>, utilizados comúnmente en aplicaciones de media y alta tensión se presenta la *Tabla 1*, mediante la cual se observan claramente las justificaciones para elegir tecnología de vacío sobre cualquier otra tendencia de interrupción actual, que hasta hace unas décadas solo se consideraban los seccionadores de SF<sub>6</sub>. En cuanto al tema ambiental cabe aclarar consideraciones emergentes que se han venido llevando a cabo mediante el protocolo de KYOTO, sobre el uso de compuestos tóxicos, en este caso el Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>), gas con alto potencial de efecto invernadero.

El potencial (relativo) de calentamiento global (GWP), o el CO<sub>2</sub> equivalente, es una medida de la contribución al efecto invernadero de una cantidad determinada de gases. El CO<sub>2</sub> se utiliza como valor de comparación, de forma abreviada CO<sub>2eq</sub> (equivalente). Este valor representa el valor medio del calentamiento en un periodo, generalmente 100 años [05]. Por ejemplo, la equivalencia en CO<sub>2</sub> del SF<sub>6</sub> en un horizonte temporal de 100 años es 22.200. Por lo tanto, el efecto invernadero de un kilogramo de SF<sub>6</sub> es 22.200 veces mayor que la de un kilogramo de CO<sub>2</sub>, y puede tardar unos 3.000 años en descomponerse en la atmósfera.

Tabla 1. Comparativo entre Seccionadores SF<sub>6</sub> e Interruptores de Vacío

<b>Seccionadores SF<sub>6</sub> Vs. Interruptores de Vacío</b>		
<b>Criterios</b>	<b>Seccionador SF<sub>6</sub></b>	<b>Interruptor Vacío</b>
Robustez Mecánica	1.000 operaciones (M1)	10.000 (M2)/20.000 operaciones
Robustez Eléctrica	100 operaciones a Ir (E3)	10.000 operaciones a Ir (E2)
Poder de corte (I <sub>sc</sub> )	20 kA a 17,5 kV por fusible (QM)	25 kA a 17,5 kV
	630 A Seccionador sin fusible (IM-NSM)	
Poder de cierre (I <sub>Ma</sub> )	50 kA	65 kA
Corriente de corta duración (I <sub>k</sub> /t <sub>k</sub> )	25 kA/1s	25 kA/3s
Corriente Pico de corta duración (I <sub>pk</sub> )	NA	65 kA/3s
Medio de Extinción	SF <sub>6</sub>	Vacío
Medio Ambiente	Reciclable - Manejo SF <sub>6</sub> (alto riesgo potencial)*	Libre de SF <sub>6</sub> Sin riesgo - Reciclable
Protección	No dispuesto para funciones de protección. El corte debe hacerlo el fusible. No apto para función ARMS de limitación de energía de arco. Obligatorio uso de PPE clase 3.	Integrada. El corte se hace en los contactos del interruptor comandado por el relé de protección. Apto para ARMS: limitación de la energía del arco a menos de 1 Cal/cm <sup>2</sup> . No PPE.

<b>Seccionadores SF<sub>6</sub> Vs. Interruptores de Vacío</b>		
<b>Criterios</b>	<b>Seccionador SF<sub>6</sub></b>	<b>Interruptor Vacío</b>
	Limitado para operación bajo carga a la máxima capacidad del fusible aplicable: 160 A.	Sin limitación. Puede operar a plena carga hasta la corriente nominal: 630 A.
Elementos adicionales	Seccionador porta fusible para protección. Requiere reemplazo de fusibles.	Relé de protección completamente ajustable con curvas normalizadas

Fuente: Elaboración propia

#### **4.4 RELÉS DE PROTECCIÓN**

De la mano con los interruptores de vacío cabe incluir los relés de protección basados en microprocesador, especialmente por características como: precisión en la coordinación de protecciones, exactitud en la calibración, confiabilidad ante fallas del equipo (autodiagnóstico), monitoreo de estados y alarmas, mantenimiento casi nulo, etc. [06]. Esto permite que la distribución de potencia eléctrica sea segura dada la robustez de los interruptores de vacío en cuanto a su vida de operación y capacidad de interrupción, y confiable dada la precisión de los relés de protección.

Mediante los relés de protección, con la tecnología ARMS (Arc Flash Reduction Maintenance System) se prevé la reducción de energía de arco incidente en fallas como sobreintensidad de corriente instantánea, además se incluyen protecciones de sobrecarga, retorno de corriente, subtensión y sobretensión. La integridad de empleados calificados trabajando en zonas con equipos eléctricos energizados debe protegerse de fallas de arco eléctrico que puedan ocurrir, para lo cual se debe calcular la energía de arco incidente según la norma NFPA-70E que caracteriza la categoría de riesgo eléctrico para determinar una apropiada protección para el equipo de trabajo [07].

La implementación de relés de protección basados en microprocesador permiten reemplazar los equipos de protección ajustables de manera analógica, lo cual en términos de precisión esta un paso adelante en las tecnologías emergentes, incluyendo espacio que ocupan dichos equipos, ya que recogen varias funciones de protección en un solo equipo, simplificando la distribución de equipos en las celdas de media tensión, además de la disminución en las actividades de mantenimiento para dichos equipos.

La escalabilidad en este tipo de sistemas de protección es muy factible, ya que básicamente se deben configurar los transformadores de medida a utilizar y según el análisis de cargabilidad de la planta, es posible ajustar la corriente nominal para definir la protección del sistema de distribución y del personal capacitado para la operación del sistema de control de la subestación.

Los relés de protección pueden ser usados para dar características sofisticadas a los interruptores de vacío, incluyendo la precisión en la calibración de los niveles de protección por corriente o voltaje, además de la visualización para monitoreo y comunicación industrial con sistemas de control supervisorio y adquisición de datos (PQSCADA).

## **5. METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN PARA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO**

Para llevar a cabo este proyecto es necesario implementar en el centro de distribución de potencia eléctrica y en el control automático de la subestación principal la siguiente metodología:

1. Identificar los elementos de un sistema de gestión energética, teniendo como referencia la operación y el funcionamiento de los sistemas de gestión energética con los que cuentan, especialmente, la Industria de Alimentos y UNE-EPM Telecomunicaciones.
2. Consultar e identificar la operación de al menos un sistema de gestión energética reportado en la literatura en Colombia y otros países.
3. Definir criterios y condiciones de operatividad que contemplará la optimización del sistema de potencia eléctrica en la Industria de Alimentos, especialmente las diez subestaciones en la operación de los sistemas de medición, transmisión y adquisición de datos para toda la planta.
4. Realizar la ingeniería de detalles en la optimización del sistema de potencia eléctrica con base a los criterios y condiciones previamente definidos para cada sistema, acorde a las condiciones de conectividad y estructura física de la Industria de Alimentos.
5. Compilar la ingeniería con detalles para los diseños conceptual, técnico y metodológico para la optimización del sistema de potencia eléctrica, con el propósito de cumplir el diseño global del sistema y así mismo opere como un sistema automático de variables eléctricas.
6. Realizar mediante el software LabVIEW la interfaz gráfica que permita el monitoreo de los centros de carga.
7. Realizar mediante el software ELSPEC las mediciones del factor de potencia y la calidad de la energía entregada a la planta en la Industria de Alimentos.

8. Monitorear desde el software PQSCADA las fallas de cada transformador cuando se produce un corte de energía de 2 segundos con la carga conectada al transformador afectado.

## **5.1 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO**

Uno de los propósitos es optimizar el sistema eléctrico incrementando la capacidad de suministro total de la potencia eléctrica a la planta con una proyección de diez años, además se pretende mejorar la maniobrabilidad en la operación, en la confiabilidad del suministro ininterrumpido de la energía eléctrica, la seguridad disminuyendo la cantidad de energía emitida por una falla en los interruptores en vacío, se implementara un sistema de monitoreo y control automático lo cual permite una disminución en los tiempos de paro del suministro de energía eléctrica a la planta en el centro de distribución de potencia eléctrica y esto se lograra mejorando la disposición de los elementos constitutivos de los circuitos para el centro principal de distribución de potencia eléctrica por medio de nuevas tecnologías que han de ser implementadas, tales como interruptores de vacío como última tecnología en interrupción en media tensión sin componentes tóxicos para el medio ambiente, y relés de protección de alta velocidad basados en microprocesador, incluyendo modos de configuración para disminuir la energía incidente de arco eléctrico en caso de fallas, teniendo como resultado una mayor capacidad de suministro de energía eléctrica a la planta de la Industria de Alimentos.

Para garantizar el suministro de energía eléctrica a la planta se consideró adquirir un nuevo transformador de similar capacidad al existente de 3,5 MVA, con el objetivo de alimentar independientemente dos grupos de subestaciones y/o la carga total de subestaciones con uno o los dos transformadores en pleno funcionamiento. Adicionalmente el transformador adquirido se recomienda que deba ser tipo ahorrador (pérdidas bajas en el cobre y hierro).

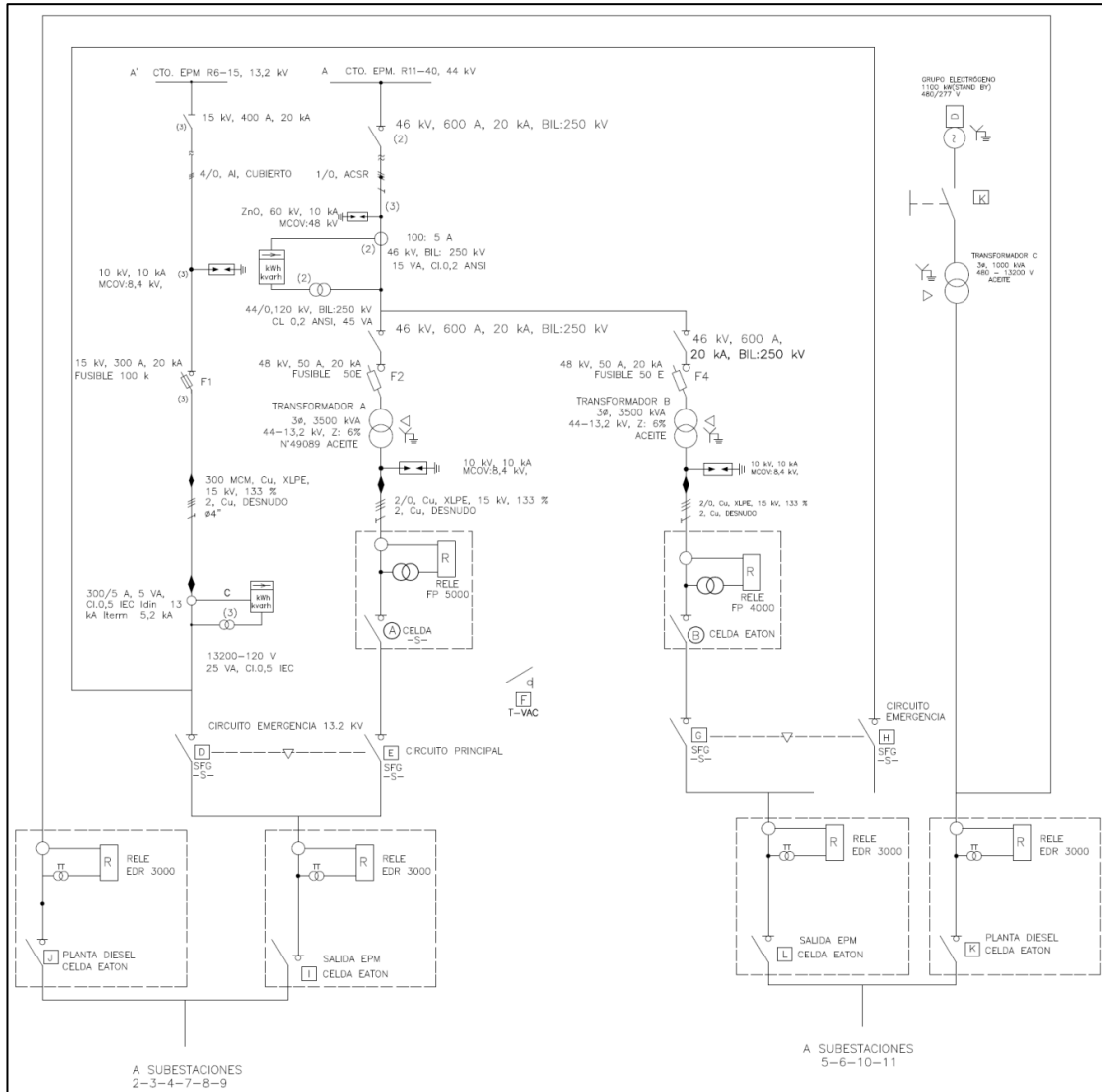
Por parte de la red EPM sugiere datos para un circuito residencial de 13,2 kV de 3,5 MVA que funciona como red de emergencia y una planta diésel de 1,1 MVA que entraría en operación de ser necesario, esto es para el caso que los circuitos de EPM no estén en operación o en falla y no respondan por cualquier circunstancia por el suministro del fluido de energía eléctrica para la industria, para esto es necesario tener un último recurso la planta diésel de 1,1 MVA para terminar los procesos productivos de la planta que puedan ser de gran valor, adicionalmente la carga total está dividida en dos grupos de subestaciones lo que permite tener una mayor confiabilidad en el suministro de energía y poder configurar los interruptores de media tensión de tal forma que se puedan utilizar las tres fuentes de energía eléctrica seleccionando como primera opción el circuito industrial de 44,0 kV, para los casos de emergencia la primera opción es el circuito residencial de 13,2 KV y la última opción el grupo electrógeno o el generador diésel evitando un paro de planta por falta del suministro de energía, todo optimizado desde un control automático que está ubicado el centro de distribución de potencia eléctrica.

Los equipos de protección son seleccionados según la configuración que se muestra en un diagrama unifilar eléctrico Figura 2, (S/E principal) que se busca contar con una implementación tecnológica que permita evitar un riesgo de impacto ambiental como el uso de interruptores de vacío reemplazando interruptores en Hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ). [01]

Los interruptores, reconectadores y seccionadores usados en una subestación de media tensión tanto manuales como automáticos deberán cumplir una norma técnica internacional como IEC 62265-1 (interruptores), IEC 62271-100 (interruptores), IEC 62271-102 (seccionadores), IEC 62271-105 (fusible – seccionador), de reconocimiento internacional IEC 60265-1 o NTC que le aplique y demostrar su cumplimiento mediante certificado de conformidad con dicha norma [02].

Para la conformidad, se deberán realizarse por normas las siguientes pruebas: Dieléctricas (BIL y frecuencia industrial), ensayo de incremento de temperatura, operación mecánica, corrientes soportables de corta duración y valor pico, en el caso de ésta no han sido calculados.

Figura 2: Diagrama unifilar de la subestación principal, ver anexos. [01]



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.



## 5.2 CÁLCULOS TÉCNICOS DEL PROYECTO

### 5.2.1 Consideraciones para el sistema

Consideraciones que son tomadas a partir de un análisis anterior para el posterior desarrollo del proyecto son las siguientes:

- El punto de conexión en la red con tensión de 44,0 kV correspondiente al circuito R11-40, y que comprenda unos niveles de corriente de falla trifásica.<sup>2</sup>
- El punto de conexión en la red con tensión de 13,2 kV correspondiente al circuito R06-15, y también comprende unos niveles de corriente de falla trifásica.
- El punto de conexión de la red del grupo electrógeno, correspondiente al circuito de emergencia de 1,1 MVA y representado por la planta diésel.

Para simplicidad del informe, los cálculos del proyecto y la demanda más alta solo son tomados en el punto de la red con tensión de 44,0 kV del circuito R11-40 desde la red operadora EPM.

Para la determinación de la corriente de cortocircuito se debe tener en cuenta los siguientes:

- La impedancia en los transformadores de potencia es referida en general a la calificación de autoventilados o sea transformador de base OA/FOA.
- Los kV son referidos a la tensión de línea a línea en kilovoltios.
- La impedancia ( $Z$ ) es referida a la impedancia de línea a neutro del sistema de falla donde  $R + Xj = Z$ .
- Cuando se totalizan las componentes del sistema de impedancia ( $Z$ ), una combinación aritmética de impedancia como “Z por unidad” (sistema por unidad), es considerado un método abreviado o aproximado; una combinación adecuada de impedancias que pueden ser de la fuente, cables de

---

<sup>2</sup> Datos suministrados por el operador de red EPM.

transformadores, conductores, etc., debe utilizar las componentes individuales R y X.

### **5.2.2 Análisis de la distribución de demanda en las cargas del sistema.**

Una consideración muy importante en el diseño de un sistema de distribución es asegurarse de que proporciona la calidad de servicio necesario a las distintas cargas. Esto incluye atender en condiciones normales y, en condiciones anormales, proporcionando la protección deseada a los equipos de servicio y del sistema de modo que las interrupciones de servicio se reduzcan al mínimo conforme con un diseño económico y mecánico.

En condiciones normales, los factores técnicos importantes incluyen perfiles de tensión, pérdidas, flujo de carga, los efectos de arranque de motores, la continuidad del servicio y confiabilidad. Las principales consideraciones en condiciones de fallas son la protección de equipos, aislamiento de fallas y continuidad del servicio. Durante la etapa de planificación preliminar del sistema, antes de la selección de los equipos de distribución, varios sistemas de distribución deben ser analizados y evaluados, incluyendo factores técnicos y económicos. Durante esta etapa, si el tamaño del sistema y/o su complejidad se justifican, puede ser apropiado para realizar una revisión a fondo de cada sistema tanto en condiciones normales como en condiciones anormales.

En los principales tipos de programas para proporcionar estudios sobre un sistema de potencia eléctrica incluyen:

- Cálculos de cortocircuitos de corrientes de falla trifásicas.
- Cálculos de los niveles de energía de arco eléctrico.
- Identificación de la capacidad de los interruptores.
- Determinar las características y configuraciones para la coordinación de las protecciones.
- Simulación de flujo de carga en condiciones normales.

Demanda y consumo de energía eléctrica de la subestación anterior en la planta de la Industria de Alimentos.

En esta sección se debe verificar la demanda y el consumo de energía con la página de EPM y el software de LabVIEW y ELSPEC instalado (ver Fig. 3).

Tabla 2: Demanda de energía en las subestaciones de la industria.

S/Es	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	Total
Carga (kW)	288,50	182,68	160,98	141,02	65,11	829,83	670,84	1020,17	165,68	3524,82

Fuente: elaboración propia

Figura 3: Demanda y consumo de energía en la subestación principal. [01]



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

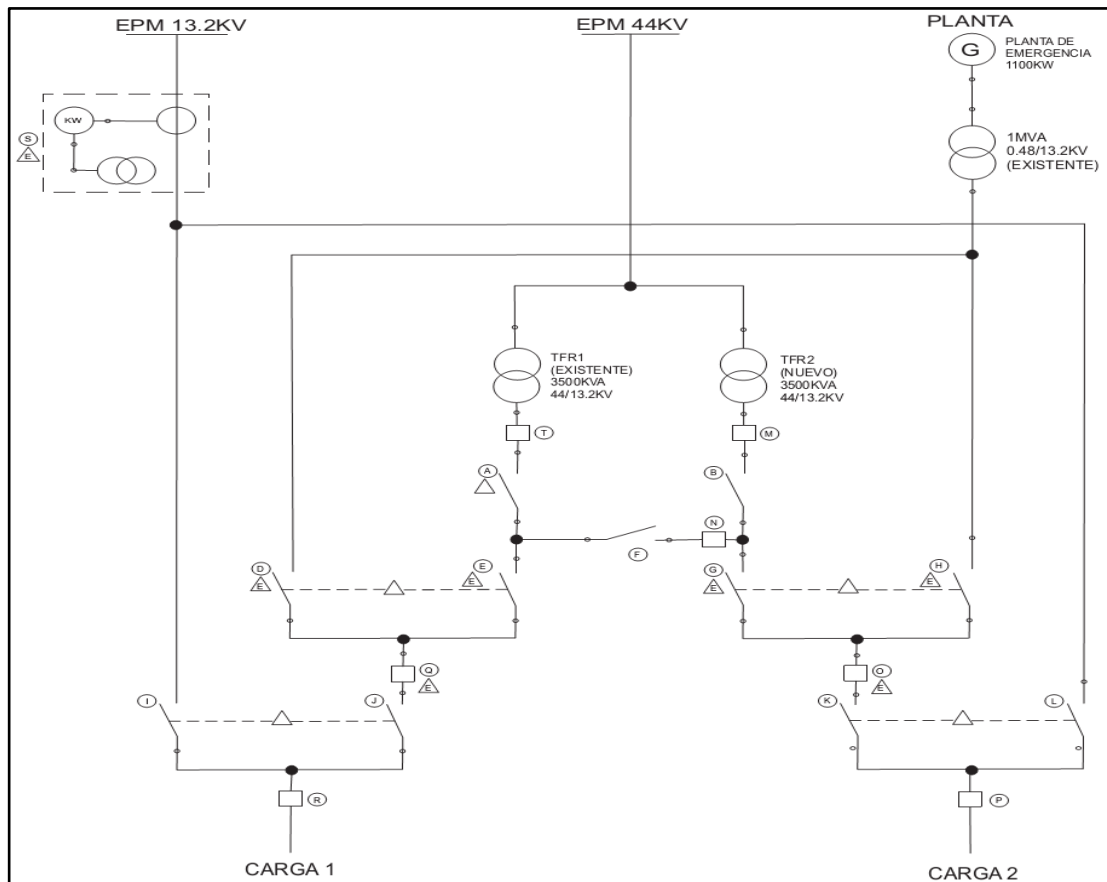
### 5.2.3 Distribución de las cargas del flujo eléctrico en las diez subestaciones.

La distribución de las cargas del flujo de energía eléctrica se deriva o consta de 9 subestaciones alimentadas desde los dos transformadores N°1A y N°1B, donde cada subestación tiene un transformador de baja tensión entre 480/220 V.

La

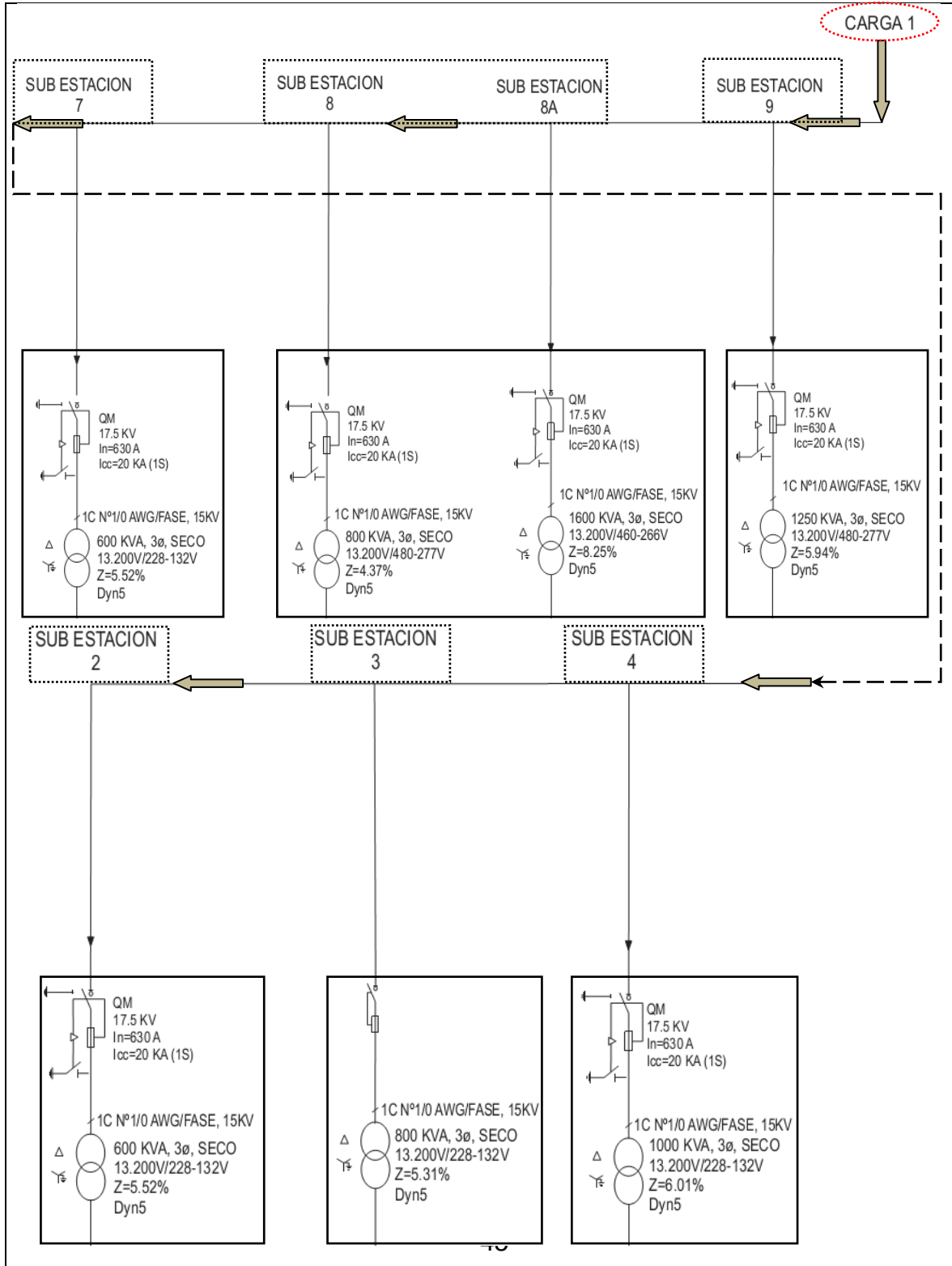
Figura 4 muestra el diagrama unifilar de la subestación principal, la red de EPM 44,0 kV cuenta con un transformador de media tensión N°1 (Antiguo), el cual alimenta a las subestaciones 2, 3, 4, 7, 8 y 9 (carga 1, ver *Figura 5*), y un transformador N°2 (Nuevo) alimenta a las subestaciones 5, 6 y 10 (carga 2, ver *Figura 6*). (Ver anexos, el diagrama unifilar completo) [01].

Figura 4: Diagrama unifilar de la S/E principal. [01]



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

Figura 5: Diagrama unifilar de la red del transformador de MT N°1A alimenta a las



subestaciones 2, 3, 4, 7, 8 y 9. [01]

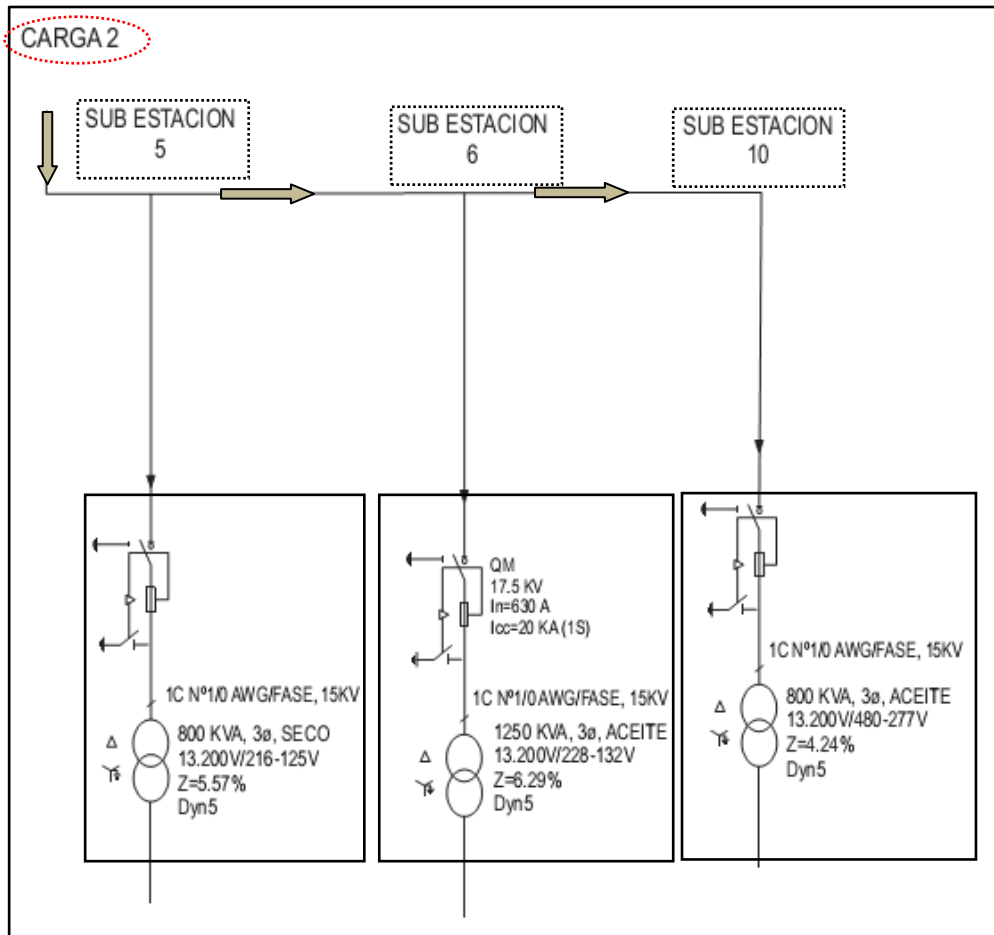


Figura 6: Diagrama unifilar de la red del transformador de MT N°1B alimenta a las subestaciones 5, 6 y 10. [01]

#### **5.2.4 Determinación de niveles de cortocircuito para la subestación principal.**

El sistema de alimentación de potencia del fluido energía eléctrica en la Industria de Alimentos, está conformada por dos circuitos alimentadores desde el operador de la red EPM, con un circuito industrial a 44,0 kV y otro circuito residencial a 13,2 kV; además hay un generador diésel de 1,1 MVA, este sistema cuenta con un arreglo de 7 interruptores y dos doble tiros para operación de la subestación principal; en el circuito de 44,0 kV hay dos transformadores reductores de 44,0/13,2 kV con una potencia de 3,5 MVA cada uno y con un seccionador principal, dos grupos de seccionador con su fusible para cada transformador, un pararrayos por fase de 46 kV, un sistema de medida con dos transformadores de potencial (TP), dos transformadores de corriente (TC) y un contador de energía QUANTUM, el circuito de 13,2 kV solo tiene el sistema de medida, el generador diésel que tiene un transformador elevador de 0,44/13,2 kV. El sistema eléctrico derivado consta de 9 subestaciones alimentadas desde los dos transformadores N°1A y N°1B, donde cada subestación tiene un transformador de baja tensión entre 480/220 V. La red del transformador de media tensión N°1A (Antiguo) alimenta a las subestaciones de baja 2, 3, 4, 7, 8 y 9, y la red del transformador de media tensión N°1B (Nuevo) alimenta a las subestaciones de baja 5, 6 y 10. [01].

Los cálculos de cortocircuito definen las corrientes de falla transitoria y en estado estacionario para corriente de media y baja tensión de los interruptores, fusibles y barrajes en cualquier ubicación seccionadora en el sistema, también determinan el efecto sobre el sistema después de retirar el suministro eléctrico debido a la operación del interruptor y/o a cortes programados de fluido eléctrico. Los programas de software pueden identificar la corriente de falla en cualquier segmento de línea a fuente conectada al sistema.

Los resultados de estos cálculos permiten optimizar el servicio a las cargas además de la aplicación adecuada de los equipos para el control automático en el centro de distribución de potencia eléctrica dentro de los límites previstos.

Para el punto de conexión en la red con tensión de 44,0 kV correspondiente al circuito R11-40, es el escogido para los cálculos y comprende los siguientes niveles de corriente de falla trifásica<sup>3</sup>:

- Corriente simétrica de 2,37 kA.
- Corriente asimétrica de 5,30 kA.
- La relación X/R trifásica es de 5,36.

Los transformadores de media tensión (Nº1A y Nº1B) que están ubicados en el patio adyacente a la subestación principal y tienen las siguientes características<sup>4</sup>:

Tabla 3: Características de los transformadores Nº1A y Nº1B.

<b>Características</b>	<b>Transformadores</b>	
	<b>Nº1A</b>	<b>Nº1B</b>
Potencia.	3500 kVA	3500 kVA
Relación.	44,0/13,8 kV	44,0/13,6 kV
Corriente de entrada. $I_1$	45,9 A	45,9 A
Corriente de salida. $I_2$	146,4 A	148,6 A
Impedancia. $Z_{CC}$	6,55 %	6,26 %
Corriente simétrica AT/BT. $I_{ccs}$	0,734/2,23 kA	0,734/2,37 kA

Las siguientes tablas, Tabla 4, Tabla 5, y Tabla 6, son las pérdidas en los transformadores de media y baja tensión que están ubicados en las subestaciones principal y secundarias en la Industria de Alimentos.<sup>5</sup>

<sup>3</sup> Datos suministrados por el operador de red EPM. 2013.

<sup>4</sup> Datos suministrados por la Industria de Alimentos. 2013.

<sup>5</sup> Datos suministrados por el operador de red EPM. 2013.



Tabla 4: Perdidas en los transformadores en aceite a 13,2 kV

<b>TRAFOS EN ACEITE 13,2 kV</b>			
Potencia (kVA)	Perdidas en el hierro $P_{Fe}$ (kW)	Perdidas en el cobre $P_{Cu}$ (kW)	Perdidas total $P_K$ (kW)
500	1,09	5,78	4,69
600	1,24	6,83	5,59
630	1,29	7,14	5,86
800	1,52	8,90	7,38
1000	1,78	11,10	9,32
1250	2,09	13,50	11,41
1600	2,52	16,70	14,18

Tabla 5: Perdidas en los transformadores en secos a 13,2 kV

<b>TRAFOS SECOS 13,2 kV</b>			
Potencia (kVA)	Perdidas en el hierro $P_{FE}$ (kW)	Perdidas en el cobre $P_{CU}$ (kW)	Perdidas total $P_K$ (kW)
500	1,60	6,95	5,35
600	1,81	8,03	6,22
630	1,87	8,35	6,48
800	2,21	10,07	7,86
1000	2,60	12,29	9,69
1250	3,03	14,79	11,76
1600	3,53	18,46	14,93

Tabla 6: Perdidas en los transformadores en aceite a 44,0 kV

<b>TRAFOS EN ACEITE 44,0 kV</b>			
Potencia (kVA)	Perdidas en el hierro $P_{FE}$ (kW)	Perdidas en el cobre $P_{CU}$ (kW)	Perdidas total $P_K$ (kW)
3000	4,74	29,00	24,26
3500	5,35	32,60	27,25
3750	5,65	34,40	28,75

Dichos parámetros son utilizados para caracterizar los componentes de la red y proceder a los cálculos preliminares de la corriente de cortocircuito. Para realizar el cálculo de la corriente de cortocircuito se han de tener varios casos, esto de acuerdo a la fuente de alimentación de la red.

Hay tres casos de alimentación que los transformadores principales puedan ejercer donde la primera alimentación es para los dos transformadores que tienen cargas independientes, pero por la configuración del centro de distribución de cargas o de potencia eléctrica sólo se calcularon dos de éstas alimentaciones, un transformador puede alimentar toda la carga y/o los dos transformadores pueden trabajar en paralelo sincronizado.

**CASO I: Dos transformadores en paralelo para las cargas.**

La impedancia equivalente de la fuente de alimentación en los dos transformadores en paralelo.

$$\frac{1}{Z_{1A}} + \frac{1}{Z_{1B}} = \frac{1}{Z_{Eq}} = \frac{1}{Z_T} \Rightarrow Z_T = \frac{Z_{1A} Z_{1B}}{Z_{1A} + Z_{1B}} \quad 01$$

Z<sub>1A</sub>: Impedancia del transformador existente en la subestación.

Z<sub>1B</sub>: Impedancia del transformador nuevo implementado a la subestación.

Z<sub>T</sub>: Impedancia total de la equivalencia de los dos transformadores en paralelos.

La impedancia (Z) está definida por la reactancia (X) y la resistencia (R) de la fuente alimentación.

$$Z_T^2 = X^2 + R^2 \Rightarrow Z_T = \sqrt{X^2 + R^2} \quad 02$$

La resistencia (X) de la red, a partir de las pérdidas en el cobre (P<sub>Cu</sub>) para cada transformador de 3500 kVA donde corresponde a las pérdidas a plena carga (P<sub>pc</sub>) y las pérdidas en vacío (P<sub>0</sub>).

$$R = \frac{P_{Cu}}{P_{TRAFO}} = \frac{P_{pc} - P_0}{P_{TRAFO}} \quad 03$$

Para obtener la siguiente *Tabla 6*, presenta los datos de impedancias, reactancias y resistencias de los transformadores N<sup>o</sup>1A y N<sup>o</sup>1B, se debe tener algunos datos

técnicos de los equipos o transformadores que son suministrados por la Industria de Alimentos, *Tabla 001* (Ver anexos).

Mediante el inventario (Ver anexos el pantallazo del LabVIEW) de consumo de energía se hace el cálculo total de carga eléctrica de cada subestación de la planta para determinar las corrientes de cortocircuito asociadas con la potencia del sistema eléctrico. El software xSpider Versión 2.10.1 de EATON permite realizar el cálculo de cortocircuito y la caída de tensión en cada punto de la red eléctrica.

Dichos parámetros son utilizados para caracterizar los componentes de la red y proceder al cálculo de las corrientes de cortocircuito.

El cálculo se realiza con el software xSpider para el diagrama unifilar observado en las *figuras 15, 16, 17*.

La descripción de las características de la red para cada transformador en su correspondiente subestación se presenta a continuación. La Tabla 7 presenta los parámetros de red insertados en el software para realizar los cálculos relacionados con este estudio.

Tabla 7: Parámetros de red de baja tensión, Industria de Alimentos.

TRAFOS	TIPO	TENSIÓN [V]	POTENCIA [KVA]	IMPEDANCIA [%]	PERDIDAS [KW]	Longitud CABLE 1/0 Cu XLPE 133% a S/E PPAL. [m]	CONSUMO [KW]
TR2	Seco	228	600	5,52	6,22	60	288,93
TR3	Seco	228	800	5,31	7,86	16	182,68
TR4	Seco	228	1000	6,01	9,69	85	160,98
TR5	Seco	216	800	5,57	7,86	70	141,02
TR6	Aceite	228	1250	6,29	11,41	80	76,11
TR7	Seco	460	1600	8,25	14,93	60	829,83
TR8	Seco	480	1600	8,25	14,93	60	670,84
TR9	Aceite	480	1250	5,57	11,41	60	1020,17
TR10	Aceite	480	800	4,24	7,38	80	266,77

Los resultados arrojado por el software de xSpider [04] del cálculo de las corrientes de cortocircuito se presentan en la Tabla 8, donde se pueden observar las corrientes de falla trifásica simétrica y asimétrica, para cada transformador en la entrada de media tensión y para la totalidad de cada subestación en baja tensión de acuerdo al consumo de energía eléctrica definido con anterioridad.

Tabla 8: Resultados de cálculo de cortocircuito por puntos de red.

<b>TRAFOS</b>	<b>Corriente Trifásica Simétrica [<math>I''_{k3p}</math>]</b>	<b>Corriente Trifásica Asimétrica [<math>I_{km}</math>]</b>
TR2	22,430kA	56,836kA
TR3	29,042kA	73,924kA
TR4	31,292kA	81,405kA
TR5	28,275kA	72,500kA
TR6	36,071kA	95,185kA
TR7	16,677kA	45,310kA
TR8	16,000kA	39,868kA
TR9	18,465kA	47,943kA
TR10	16,561kA	41,027kA
S/E2	12,328kA	31,092kA
S/E3	16,440kA	41,591kA
S/E4	17,893kA	46,345kA
S/E5	15,831kA	40,411kA
S/E6	20,332kA	50,925kA
S/E7	9,722kA	26,569kA
S/E8	9,261kA	22,888kA
S/E9	10,958kA	28,392kA
S/E10	9,506kA	23,122kA

Fuente: tablas 4,5,6,7,8,elaboración propia

Para el caso de trabajar ambos transformadores en paralelo se realiza el cálculo de cortocircuito tomando como corriente de falla simétrica equivalente 2,96 kA para la red de 13,2 kV, incluyendo la impedancia de la fuente (44,0 kV). Los resultados se presentan a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultados de cálculo por alimentación de transformadores en paralelo.

TRAFOS	PARALELO	
	Corriente Trifásica Simétrica [ $I''_{k3p}$ ]	Corriente Trifásica Asimétrica [ $I_{km}$ ]
TR2	23,326kA	59,041kA
TR3	30,563kA	77,697kA
TR4	33,067kA	86,004kA
TR5	29,401kA	75,335kA
TR6	37,924kA	100,132kA
TR7	17,746kA	48,339kA
TR8	16,980kA	42,195kA
TR9	19,785kA	51,350kA
TR10	17,378kA	42,945kA
S/E2	12,594kA	31,740kA
S/E3	16,917kA	42,759kA
S/E4	18,460kA	47,801kA
S/E5	16,178kA	41,277kA
S/E6	20,907kA	52,308kA
S/E7	10,075kA	27,583kA
S/E8	9,581kA	23,636kA
S/E9	11,410kA	29,552kA
S/E10	9,769kA	23,719kA

Fuente: elaboración propia

## CASO II: Un transformador para todas las cargas.

En el caso de alimentar toda la planta a partir de un solo transformador, utilizando el interruptor de acople, se obtienen los siguientes resultados, presentados en la siguiente Tabla 10.

Tabla 10: Resultados de cálculos por alimentación individual de cada transformador.

TRAFOS	TRAFO 1A		TRAFO 1B	
	Corriente Trifásica Simétrica [I'' <sub>k3p</sub> ]	Corriente Trifásica Asimétrica [I <sub>km</sub> ]	Corriente Trifásica Simétrica [I'' <sub>k3p</sub> ]	Corriente Trifásica Asimétrica [I <sub>km</sub> ]
TR2	22,430kA	56,836kA	22,612kA	57,285kA
TR3	29,042kA	73,924kA	29,348kA	74,686kA
TR4	31,292kA	81,405kA	31,649kA	82,329kA
TR5	27,990kA	71,782kA	28,275kA	72,500kA
TR6	35,609kA	93,951kA	36,071kA	95,185kA
TR7	16,677kA	45,310kA	16,894kA	45,922kA
TR8	16,000kA	39,868kA	16,199kA	40,342kA
TR9	18,465kA	47,943kA	18,731kA	48,630kA
TR10	16,353kA	40,537kA	16,561kA	41,027kA
S/E2	12,328kA	31,092kA	12,383kA	31,226kA
S/E3	16,440kA	41,591kA	16,538kA	41,831kA
S/E4	17,893kA	46,345kA	18,009kA	46,644kA
S/E5	15,741kA	40,187kA	15,831kA	40,411kA
S/E6	20,184kA	50,57kA	20,332kA	50,925kA
S/E7	9,722kA	26,569kA	9,795kA	26,779kA
S/E8	9,261kA	22,888kA	9,327kA	23,043kA
S/E9	10,958kA	28,392kA	11,051kA	28,631kA
S/E10	9,437kA	22,966kA	9,506kA	23,122kA

Fuente: elaboración propia

## 5.2.5 Determinación de protecciones para la subestación principal.

### Determinar los dispositivos de protección.

La información básica para los ajustes y coordinación de las protecciones provienen de los estudios de flujo de carga, cortocircuito y los esquemas de protección (ver anexos) indicados en la sección anterior.

Se trata a continuación la determinación de las protecciones contra sobrecorrientes (sobrecargas y cortocircuitos) en las líneas eléctricas de Media y Baja tensión de acuerdo con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Para ello, es preciso calcular los dispositivos para la protección de sobrecargas y cortocircuitos.

### Características de los dispositivos de protección contra las sobrecorrientes.

Las características de funcionamiento de un dispositivo que protege un cable contra sobrecorrientes deben satisfacer las dos condiciones siguientes:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

$$I_2 \leq 1,45 * I_Z$$

Dónde:

- $I_B$ : Es la intensidad utilizada en el circuito.
- $I_Z$ : Es la intensidad admisible según la norma UNE 20460, parte 5-523.
- $I_N$ : Es la intensidad nominal del dispositivo de protección (para los dispositivos de protección regulables,  $I_N$  es la intensidad de regulación escogida).
- $I_2$ : Es la intensidad que asegura efectivamente el funcionamiento del dispositivo de protección.

Se indica en la norma de producto o se puede leer en las instrucciones o especificaciones proporcionadas por el fabricante.

Para los interruptores automáticos ( $I_A = I_2$ ):

- $I_2 = 1,45 * I_N$  (para interruptores domésticos).
- $I_2 = 1,30 * I_N$  (para interruptores industriales).

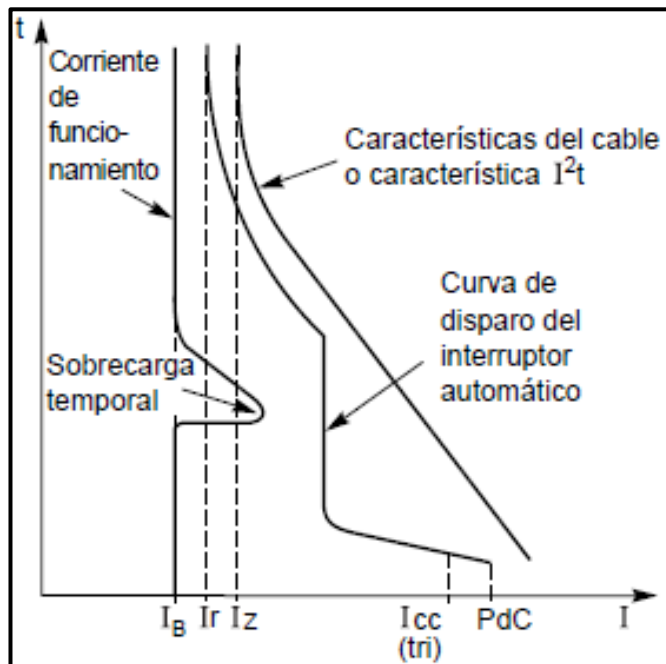
Para fusibles, la característica equivalente a la  $I_2$  de los interruptores automáticos es la denominada  $I_f$  o  $I_r$  (intensidad de funcionamiento) que es la corriente que asegura la fusión del fusible en un tiempo convencional de 1 o 2 horas, que para los fusibles del tipo K toma los valores siguientes:

$$I_f = 1,60 * I_N, \quad \text{si } I_N \geq 16A$$

$$I_f = 1,90 * I_N, \quad \text{si } 4A < I_N < 16A$$

$$I_f = 2,10 * I_N, \quad \text{si } I_N \leq 4A$$

Figura 7: Protección de un circuito por interruptor automático. [04].



Fuente: Documentación y software de EATON.



**Para la Industria de Alimentos, se tiene los siguientes datos:**

La intensidad utilizada en el circuito es:  $I_B = 153 A$

La intensidad nominal para los dispositivos de protección es ajustable:  $I_N = 630 A$ .

La capacidad de interrupción de los interruptores w-Vac-i es:  $I_k = 630 A$ .

La intensidad admisible según la norma UNE 20460 (tablas), para un conductor 2/0 XLPE con temperatura máxima (90°C) y encerrado es:  $I_Z = 185 A$

La intensidad que asegura efectivamente el funcionamiento de los dispositivos de protección, para los interruptores industriales es:

$$I_2 = 1,30 * I_Z = 1,30 * 185A = 240,5 A$$

Para los fusibles, la intensidad de funcionamiento si se tiene una  $I_N \geq 16A$  es:

$$I_f = 1,60 * I_N = 1,60 * 630A = 1008A = 1,01 kA$$

Analizando la regla general de protección  $I_B \leq I_N \leq I_Z$ , resulta evidente que se pueden realizar dos condiciones de protección distintas:

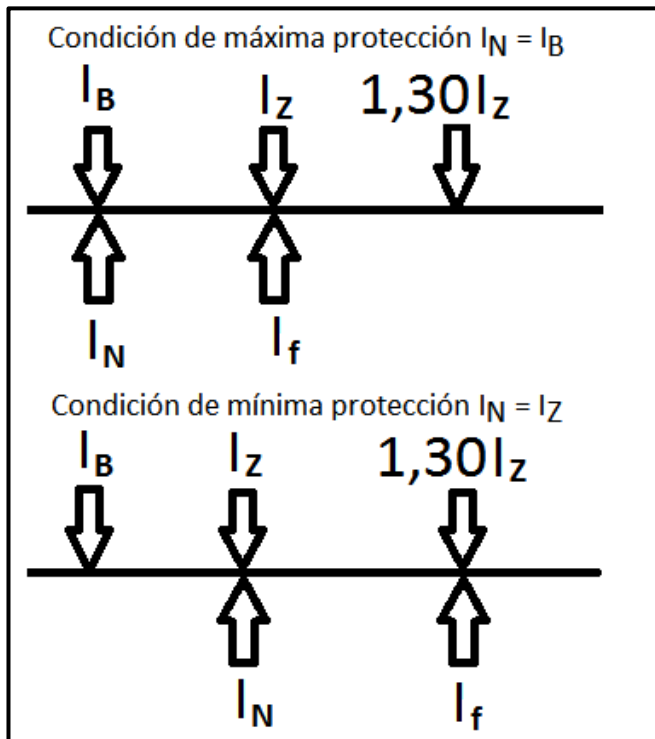
La condición de **protección máxima**, utilizando un interruptor con una corriente nominal próxima o igual a la corriente demandada o sea  $I_N = I_B$ , y una condición de **protección mínima**, escogiéndolo con una corriente nominal próxima o igual a la máxima capacidad de conducción de corriente del cable o sea  $I_N = I_Z$ .

Está claro que escogiendo la condición de **protección máxima** se puede presentar la situación de afectar la continuidad del servicio, aunque estará garantizada la operación del interruptor aún en casos de cargas anormales que puedan soportarse.

Por otra parte la selección de un interruptor con una corriente calibrada igual a la capacidad de conducción del cable, llevaría a la máxima continuidad del servicio y el máximo aprovechamiento del cobre instalado.

Estas consideraciones las debe analizar el proyectista en función del tipo de circuito que va a instalar.

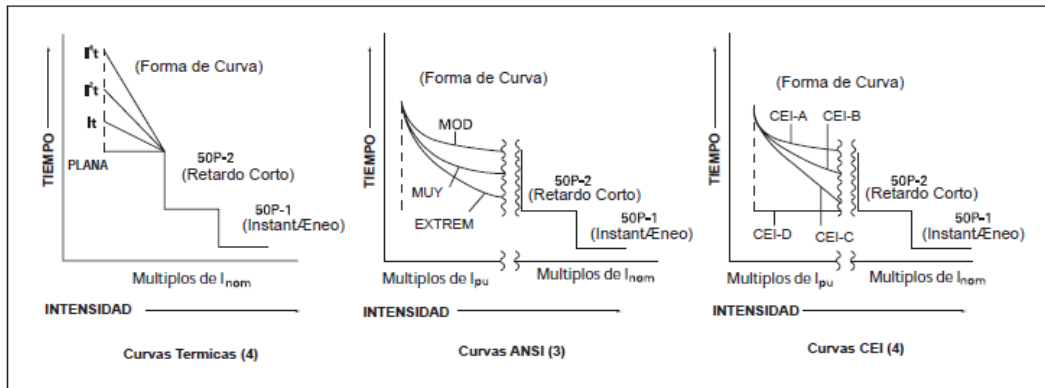
Figura 8: Condiciones máxima y mínima para protecciones. [04]



Fuente: Documentación y software de EATON.

Las curvas características para los relés de protección FP500 utilizados en la Industria de Alimentos. La protección seleccionada en la subestación principal es la forma de curva Moderadamente Inversa, por norma ANSI.

Figura 9: Curvas características de tiempo vs intensidad para los relés de protección FP5000 y EDR3000. [04].



Fuente: Documentación y software de EATON.

Las intensidades de cortocircuito de muy corta duración hay que referirse a las características  $I^2t$  facilitadas por el fabricante.

Esta condición dos, se puede transformar, en el caso de instalar un interruptor automático, en la condición siguiente, que resulta más fácil de aplicar y es generalmente más restrictiva:

$$I_{CC,Min} > I_m$$

Siendo:

$I_{CC,Min}$ : Corriente de cortocircuito mínima que se calcula en el extremo del circuito protegida por el interruptor automático.

$I_m$ : Corriente mínima que asegura el disparo magnético, se tiene:  $I_m = 10 * I_N$ .

$$I_m = 10 * I_N = 10 * 630A = 6300A = 6,3 kA$$

### 5.2.6 Criterios de selección de interruptores, fusibles y transformador.

De acuerdo con los valores mínimos y máximos de corrientes de cortocircuito trifásico en cada subestación, obtenidos anteriormente con el fin de establecer la coordinación de las protecciones de sobrecorrientes en el sistema. Los intervalos de cortocircuito se presentan a en las *Tablas 8 y 9*.

### a) Características de los Interruptores.

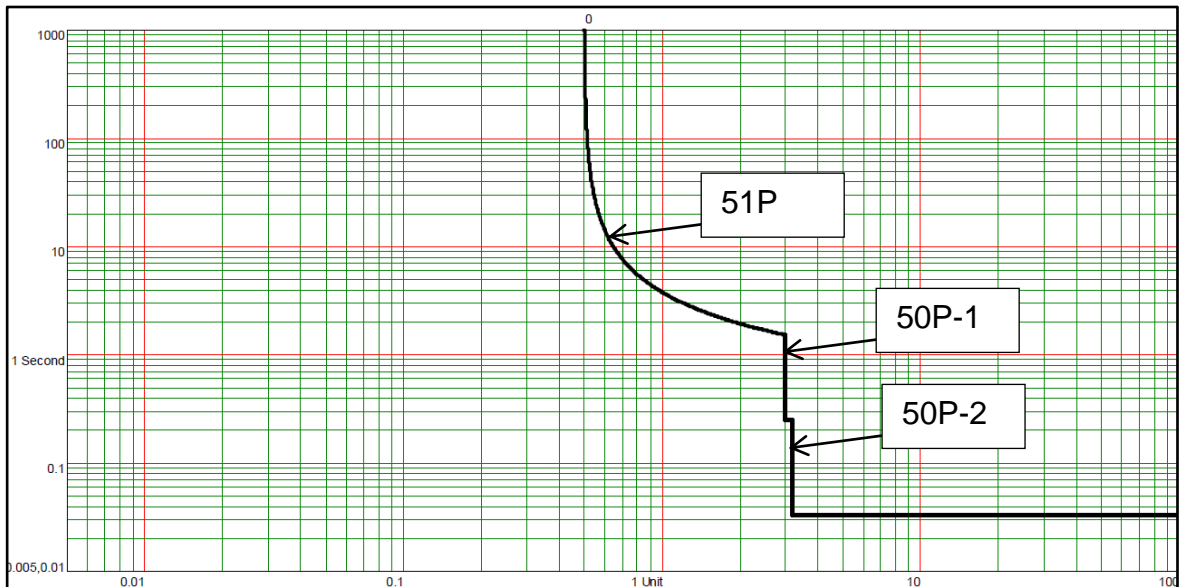
Selección de los interruptores principales:  $I_N = 630 \text{ A}$

Interruptores de tipo **17,5-W-VACi-25**: para todos los interruptores de esta referencia se escogió con el disparo de la unidad magnética de ajuste es de 10 veces la corriente nominal.

- Modelo: **17,5-W-VACi-25**.
- Voltaje nominal:  $V_N$ : 17,5 kV
- Corriente nominal:  $I_N$ : 630 A.
- Capacidad de Ruptura: 25 kA.
- Unidad de ajuste: Relé TM, calibre de 200 A
- Corriente Magnética:  $I_m = 10 * I_N = 10 * 630A = 6300A = 6,3 \text{ kA}$
- Marca: Eaton Electrical Equipment Company Ltd.

En la programación de los relés de protección se implementaron dos grupos de parámetros para definir el modo de operación de protección. En el caso de operación normal se observa la *Figura 10*, en la cual la curva de disparo tiene dos protecciones de sobreintensidad instantánea (50P – 1800 amperios) con un retardo de 15 ciclos de diferencia la una con la otra, y una protección de sobrecarga (51P).

Figura 10. Curva de disparo – Grupo 1 – Relé **W-Vaci-25** de protección Principal.

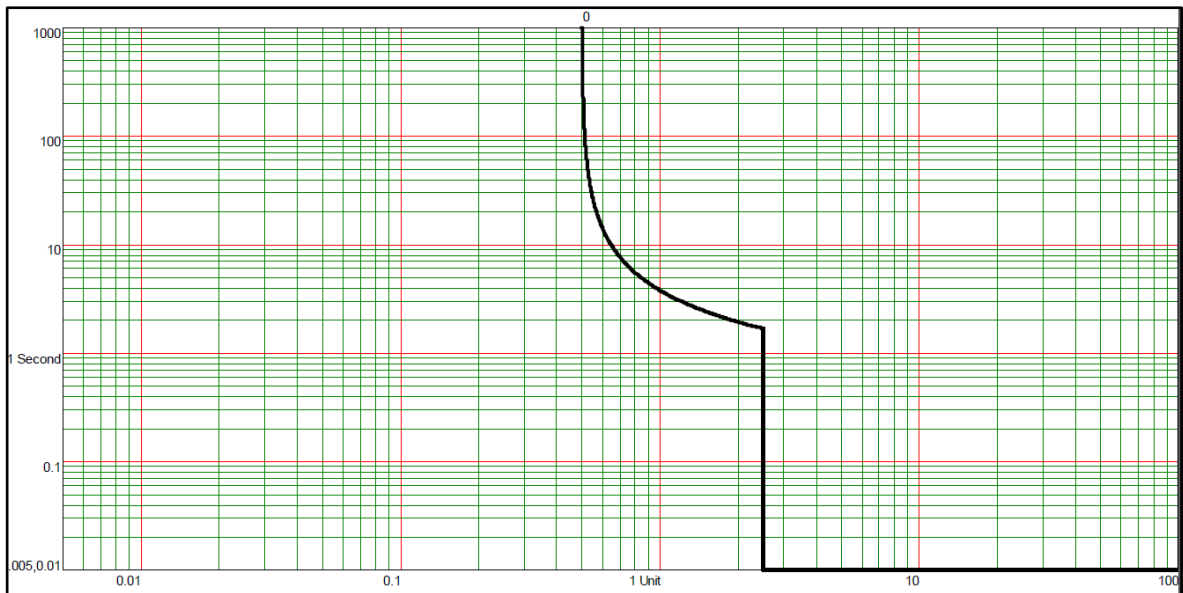


Fuente: elaboración propia

En el caso de operación en modo mantenimiento se debe tener en cuenta la energía incidente de arco eléctrico, por lo cual el nivel protección debe ser mayor y más conservativo, para evitar daños contra el personal que opera frente a las celdas de media tensión.

En la *Figura 11*, se observa la curva de disparo para el modo mantenimiento, grupo de parámetros 2, la cual muestra que la protección actúa con mayor rapidez, una sola protección contra sobreintensidad instantánea (50P – 1500 amperios), y tiene mayor sensibilidad, es decir, el límite de corriente de falla es mucho menor que la protección correspondiente del grupo de parámetros 1.

Figura 11. Curva de disparo – Grupo 2 – Relé **W-Vaci-25** de protección Principal



Fuente: elaboración propia

### b) Características de los Fusibles.

Los fusibles seleccionados tienen una capacidad de ruptura de 50 A, como la corriente máxima de cortocircuito a la que puede estar sometido es de 2.37 kA, el fabricante debe garantizar que estos fusibles pueden fundirse rápidamente cuando en una falla se presente una corriente de esta magnitud.

La característica I vs t del fusible, no debe interferir con la operación normal del interruptor, es decir que el fusible debe soportar la corriente de arranque de las cargas que es 16 veces para la **carga N°1 (Antiguo)** y 19 veces para la **carga N°2 (Nuevo)** a la corriente nominal y también debe permitirle trabajar con una sobrecarga durante un tiempo determinado.

### Especificaciones del Fusible.

- Tipo: T
- $V_N$ : 7,8/15,0 kV

- $I_N$ : 50/100 A
- $I_{Arranque, 1} = 16 * I_N = 16 * 630 A = 10,08 kA$
- $I_{Arranque, 2} = 19 * I_N = 19 * 630 A = 11,97 kA$
- Capacidad de Ruptura: 50 kA
- Marca: CELSA S.A.

Característica I vs t para fusibles.

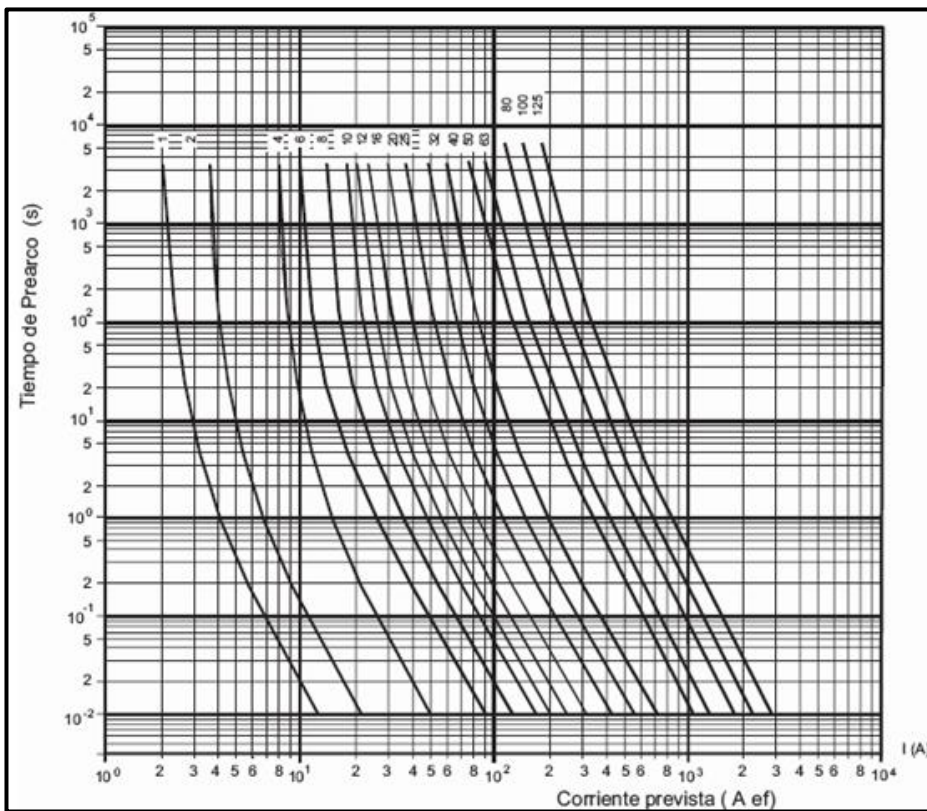


Figura 12. Curvas de capacidades para fusibles.

A continuación se verifica lo anterior:

$$I_{Arranque} = 16 * I_N = 16 * 630A = 10080A = 10,08 kA$$

$$I_{Arranque} = 19 * I_N = 19 * 630A = 11970A = 11,97 kA$$

Los fusibles seleccionados no se deben fundir al cerrar el interruptor de cada uno de los transformadores, puesto que sus características le permiten soportar esta corriente durante varios milisegundos, puesto que comienza a operar a la corriente nominal.

**c) Características de los transformadores.**

Para la determinación de las características de los transformadores se hizo uso de las **curvas de daño y corriente Inrush** aplicando la norma NTC 2797. Todos los transformadores al interior de la Subestación Principal en la Industria de Alimentos, son de **CATEGORÍA II** (transformadores de distribución de acuerdo con la norma C57.12.20–1998 del IEEE desde 500 a 5000 kVA, monofásicos o trifásicos), por lo tanto se tienen como principales curvas de daño, la curva de sobrecarga y curva de capacidad térmica, también se tiene en cuenta la curva de corriente Inrush para la selección del fusible, evitando que este se quemara al pasar esta corriente.

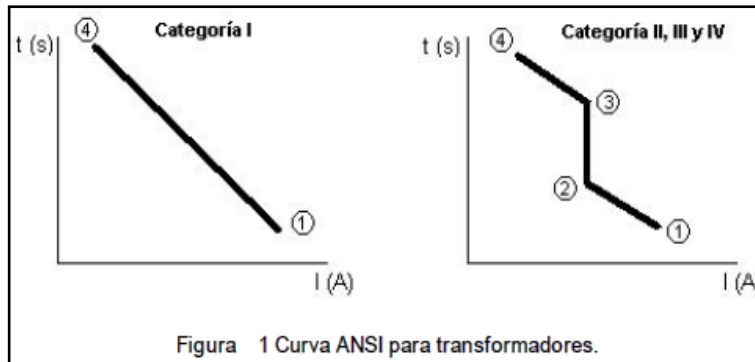
La categoría del transformador se define según la forma de la curva ANSI. Como se puede observar en la *Tabla 11* y *Figura 13* siguientes:

Tabla 11: Categoría de transformador.

CATEGORÍA DE TRANSFORMADORES		
kVA Nominales de placa (Devanado principal)		
CATEGORÍA	MONOFÁSICOS	TRIFÁSICOS
I	5 - 500	15 - 500
II	501 - 1 667	501 - 5 000
III	1 668 - 10 000	5 001 - 30 000
IV	arriba de 10 000	arriba de 30 000

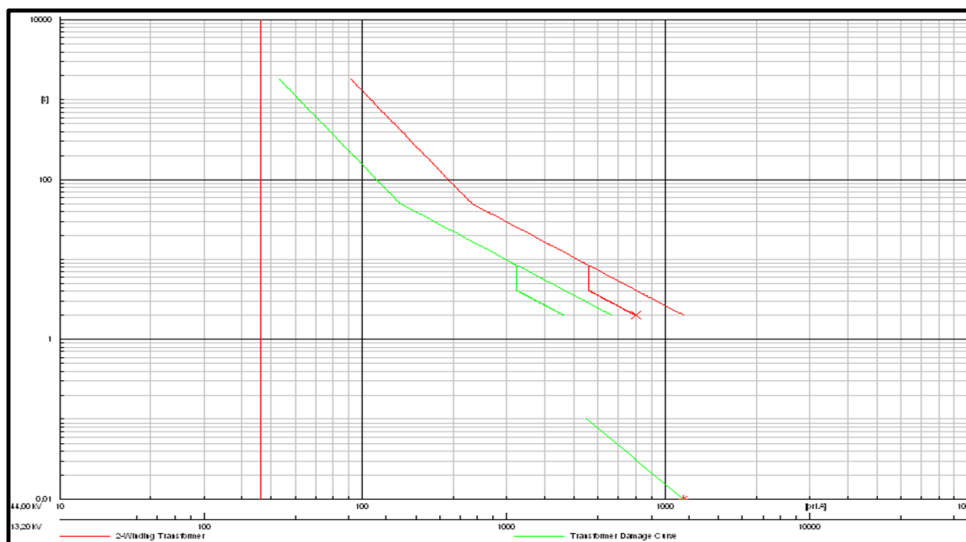


Figura 13. Curva ANSI para transformadores



La determinación de las características del transformador adquirido se observa en la *Figura 14* para la optimización del centro distribución de la energía eléctrica en la industria donde se hizo uso de las **curvas de daño y la corriente Inrush**.

Figura 14. Curvas de daño e Inrush del transformador.



### Especificaciones del transformador.

- Marca: SUNTEC
- Tipo: OTHV3
- Serie: 58670112
- Año de fabricación: 2012
- Norma: NTC

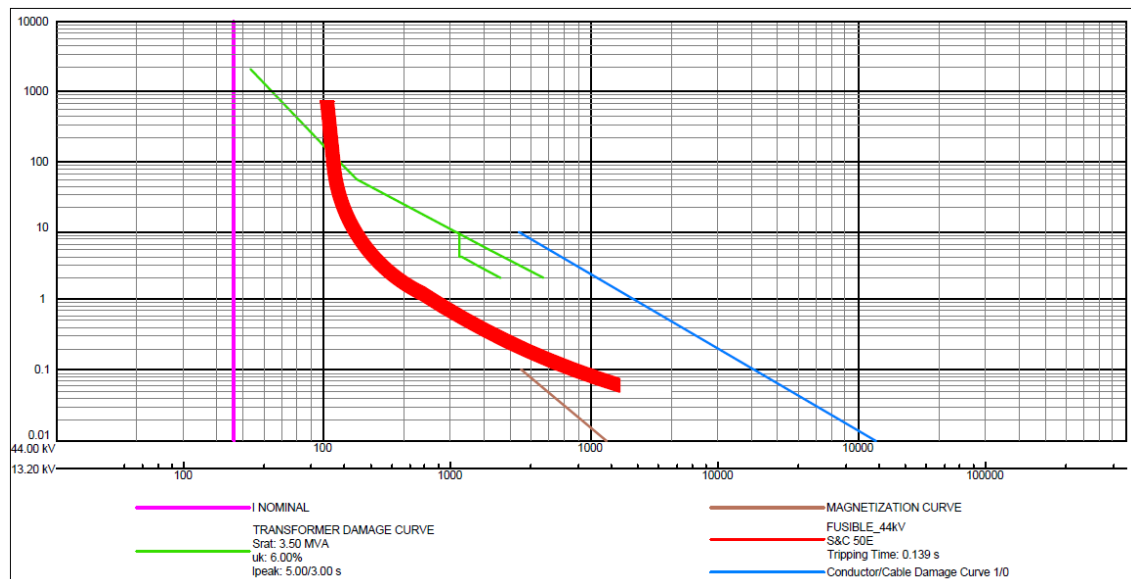
- Grupo de conexión: Dyn5
- Impedancia AT-BT: 6,26%
- $I_{CC}$  Simétrica AT-BT: 0,734/2,370 kA
- Duración del cortocircuito: 2 segundos.
- $V_{N1}$ : 44000 V
- $I_{N1}$ : 45,9 A
- $V_{N2}$ : 13600/7852 V
- $I_{N2}$ : 148,6 A

#### d) Características para las protecciones.

Luego de seleccionar los dispositivos de protección para cada uno de los centros de carga identificados, se procede a realizar la coordinación de protecciones con dichos elementos. La *Figura 15* se dará la coordinación efectuada teniendo en cuenta lo interruptor principal de cada transformador con los respectivos interruptores que se encuentren aguas debajo de los trafos principales; así mismo se realizará la correcta selección de fusibles para cada una de las corrientes *Inrush* de los trafos.

Coordinación del trafo vs fusible de media tensión.

Figura 15. Curvas de daño e Inrush de los transformador con el Fusible.



**e) Selección de Dispositivos de Protección contra Sobretensiones (DPS).**

En la subestación principal de la Industria de Alimentos cuenta en el pódico principal con dos puntas Franklin, un DPS por línea en la tensión de 44,0 kV, además los estudios de pararrayos y DPS fueron realizados por las firmas de ingenieros “**Ingeniería Especializada S.A.**” y “**OMC S.A.**” para la Industria de Alimentos donde recopilaron la información técnica acerca de alimentación de las instalaciones, con el fin de seleccionar los protectores acorde con las características de operación de los equipos.

**Características del sistema de alimentación de los equipos.**

El sistema eléctrico de la Industria de Alimentos en condiciones normales se alimenta del circuito R11-40 la red primaria de 44,0 kV al cual es conectada a dos transformadores de 3,5 MVA y la red de respaldo de 13,2 kV del circuito R06-15, ambos circuitos de propiedad de EPM.

De la subestación principal se derivan dos circuitos a 13,2 kV los cuales se distinguen con los nombres de Generación y Presidencia.

Para la protección de las acometidas en 44,0 kV y 13,2 kV se utilizan fusibles, así como para las derivaciones a 13,2 kV para Presidencia y Generación.

De acuerdo con la información suministrada por EPM, se tiene los niveles de cortocircuito en los puntos de conexión a 44,0 kV y 13,2 kV, tal como se muestra en la *Tabla 12*.

Tabla 12: Datos de los circuitos de alimentación primaria.

Número del circuito	R11-40 (44 kV)	R06-15 (13,2 kV)
Corriente de falla trifásica simétrica [kA]	2,44	7,15
Corriente de falla monofásica simétrica [kA]	2,93	5,99
Corriente de falla trifásica asimétrica [kA]	5,55	12,92
Corriente de falla monofásica asimétrica [kA]	6,20	10,37

## Ajuste de protecciones.

Teniendo en cuenta que el esquema utilizado para la protección del sistema eléctrico corresponde a la utilización de fusibles en las acometidas principales, así como en las derivaciones de la subestación y solo se tiene relé de protección ajustable para los interruptores principales de 13,2 kV de definición de ajuste solo corresponde a estos últimos.

Los relés instalados para la protección de la subestación de distribución a 13,2 kV tienen cuentas con funciones de corriente y tensión, la *Tabla 13* se muestran los criterios de ajuste para cada una de las funciones de protección en los relés.

Tabla 13: Criterios de ajuste de protecciones de sobrecorriente.

Sobrecorriente de fases	Característica	Criterio
Protección 51, sobrecorriente de tiempo Inverso	Corriente de arranque	El menor de los siguientes valores : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corriente máxima soportada por el conductor en estado estable.</li> <li>• Capacidad nominal del transformador de potencia multiplicado por un factor de 130% de sobrecarga.</li> </ul>
	Tipo de curva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extrema Inversa. (Debido a la presencia de fusibles aguas abajo)</li> </ul>
	Valor de la curva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se selecciona para que presente un margen de coordinación de 200 ms con los fusibles aguas abajo.</li> <li>• Se verifica con la curva de daño del alimentador y del transformador de potencia.</li> </ul>
Protección 50, sobrecorriente de tiempo Definido	Corriente de arranque	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 50% de la corriente de cortocircuito trifásico o monofásico (el menor de los dos) en la barra del extremo final del alimentador.</li> <li>• Menor a la curva de soportabilidad del conductor asociado, para la máxima corriente de corto circuito en el extremo local.</li> <li>• Buscar coordinación con los elementos aguas arriba y aguas abajo.</li> </ul>
	Tiempo de operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 50 ms o según coordinación con elementos aguas arriba y aguas abajo.</li> </ul>

Sobrecorriente residual	Característica	Criterio
Protección 51N, sobrecorriente de tiempo Inverso	Corriente de arranque	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalmente se ajusta el arranque en un valor de 30 % de la máxima corriente nominal.</li> <li>• Teniendo en cuenta que no se presentaría selectividad con los fusibles aguas abajo, se ajusta similar a la sobrecorriente de fases.</li> </ul>
	Tipo de curva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extrema Inversa.</li> </ul>
Protección 50N, sobrecorriente de tiempo Definido	Corriente de arranque	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalmente se ajusta en 3 veces la corriente nominal del circuito.</li> <li>• Teniendo en cuenta que no se presentaría selectividad con los fusibles aguas abajo, se ajusta similar a la sobrecorriente de fases.</li> </ul>
	Tiempo de actuación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 50 ms o según coordinación con elementos aguas arriba y aguas abajo.</li> </ul>

Sobrecorriente secuencia negativa	Característica	Criterio
Protección 46 secuencia negativa	Corriente de arranque	Como ajuste preliminar puede ser del orden del 25% de la corriente nominal del sistema, pero este valor debe ser verificado en sitio, de manera que este elemento no quede disparando para condiciones normales de carga.
	Tipo de curva	Característica de tiempo definido.
	Valor de la curva	El tiempo de operación de este elemento se debe coordinar con los demás elementos de sobrecorriente, asegurándose que sea mayor al tiempo de operación de cualquier otra protección al nivel mínimo de falla. Este tiempo de retardo debe ser relativamente alto para garantizar que esté por encima de cualquier otro dispositivo de protección, por lo tanto, se ajusta con una característica de tiempo definido (DMT) en 1000 ms.

Fuente: elaboración propia

Cálculos de ajustes, realizados por las firmas “**Ingeniería Especializada S.A.**” y “**OMC S.A.**” para la Industria de Alimentos, con una  $RCT=150/5=30$ .

**SOBRECORRIENTE DE FASES (51):**

- Capacidad de corriente del conductor en estado estable:
  - De acuerdo con el NEC para el conductor de aluminio 1/0 aislado a 15 kV se tiene una capacidad de 200 A.
- Capacidad del transformador potencia:
  - Corriente nominal : 153,08 A
  - Corriente sobrecarga=  $153,08 \text{ A} \times 1,3 = 199 \text{ A}$

Ambos valores son similares por lo tanto se ajustará con 199 A

$$50/51 \text{ 1A} = 199 \text{ A}$$

$$\text{Delay} = 0,2$$

$$\text{Curva} = \text{Extrema Inversa}$$

**SOBRECORRIENTE DE FASES (50):**

Debido a la utilización de fusibles aguas abajo y teniendo en cuenta las dificultades que se pueden presentar para la selectividad (ver anexo 2), se deja inhabilitada esta función.

**SOBRECORRIENTE DE TIERRA (51N):**

Se ajusta similar a las protecciones de fase.

$$50/51N \text{ 1A} = 199 \text{ A}$$

$$\text{Delay} = 0,2$$

$$\text{Curva} = \text{Extrema Inversa}$$

**SOBRECORRIENTE DE SECUENCIA NEGATIVA (46):**

Se toma como corriente nominal del sistema la correspondiente al transformador de 3500 kVA, es decir 153,08 A

$$I_2 (46) = 0,25 * 153,08 \text{ A} = 38,3 \text{ A.}$$

$$\text{Curva} = \text{Tiempo definido}$$

$$\text{Delay} = 1 \text{ s}$$



## **6. OPERACIÓN DEL SISTEMA IMPLEMENTADO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA SUBESTACIÓN PRINCIPAL DE DISTRIBUCIÓN**

### **6.1 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL AUTOMÁTICO.**

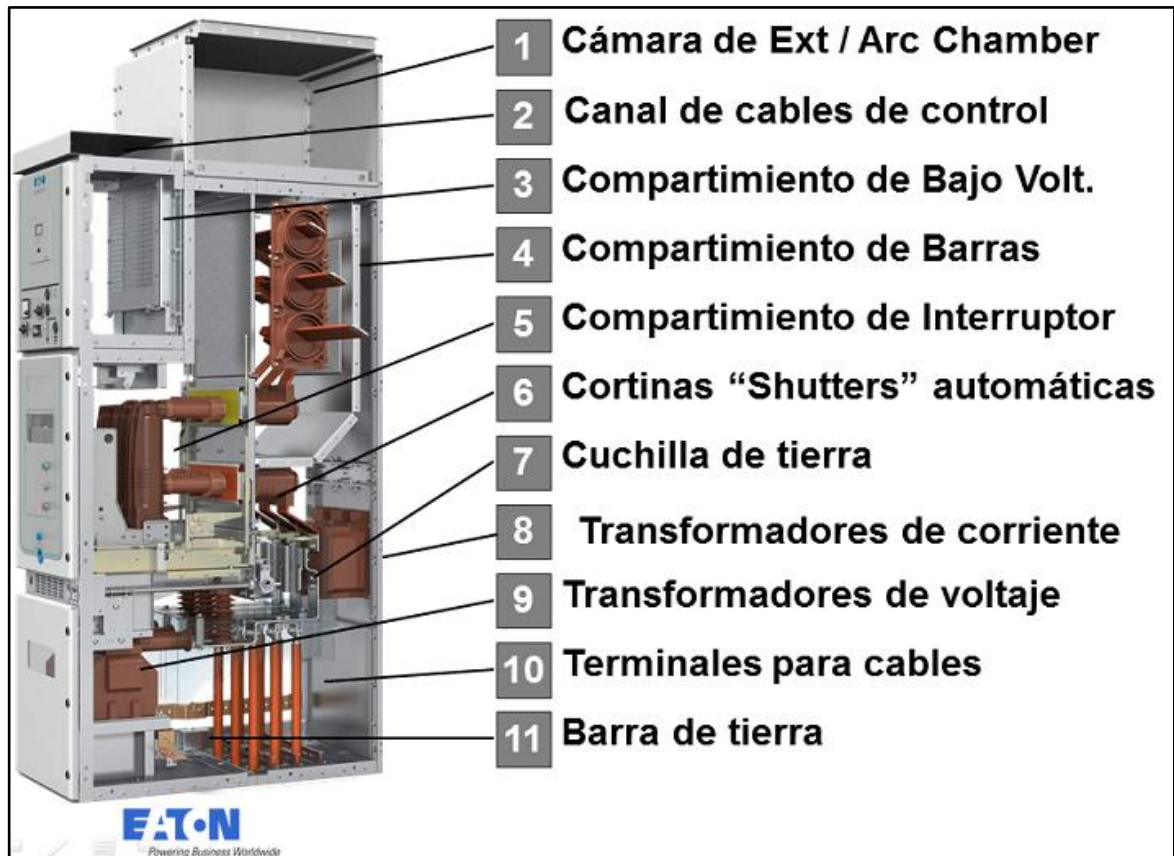
La implementación del control automático en el centro de distribución de potencia eléctrica se presenta con una visión explicativa sobre la operación de las celdas “*Power Xpert UX* (EATON)”, dentro del diseño de la Subestación Principal de la Industria de Alimentos. Se indican los enclavamientos mecánicos y eléctricos propios del diseño de las celdas y del cableado implementado en los compartimientos de bajo voltaje. De igual manera, los automatismos programados y los elementos de mando asociados son definidos para que el personal de mantenimiento en la planta tenga claridad en el momento de realizar maniobras de manera confiable y segura. Se presentan los elementos necesarios para la reposición y restablecimiento de fallas en los PLCs y los relés de protección, además de las características de configuración de los automatismos programados y los parámetros de protección implementados. En el control automático se anexan diagramas, manuales, y demás documentos de interés como los diferentes elementos tecnológicos presentes en las celdas de media tensión instaladas recientemente en la Subestación Principal de la Industria de Alimentos.

Una celda “*Power Xpert UX*” está definida como un Tablero de Media Tensión compartimentado, aislado en aire, con sistema de barra sencilla, y con capacidad para distribución en sistemas de 17,5 kV hasta 50 kA-3s, 4 kA. La Figura 17 presenta el diseño básico de las celdas “*Power Xpert UX*”, este producto está certificado de acuerdo a la norma IEC-62271-200 tercera parte (Metal-enclosed switchgear) basada en la accesibilidad a los compartimientos caracterizados por posibilidad de mantenimientos, principalmente en sistemas extraíbles, la cual introduce una clasificación del Arco eléctrico interno donde las llamas y las altas presiones producidas por el arco son alejadas del personal y dirigidas



directamente a través de la cámara de extinción con extensiones opcionales, pasa muros y rejillas de escape hacia las afueras del cuarto eléctrico.

Figura 17: Celdas “Power Xpert UX”. [01]

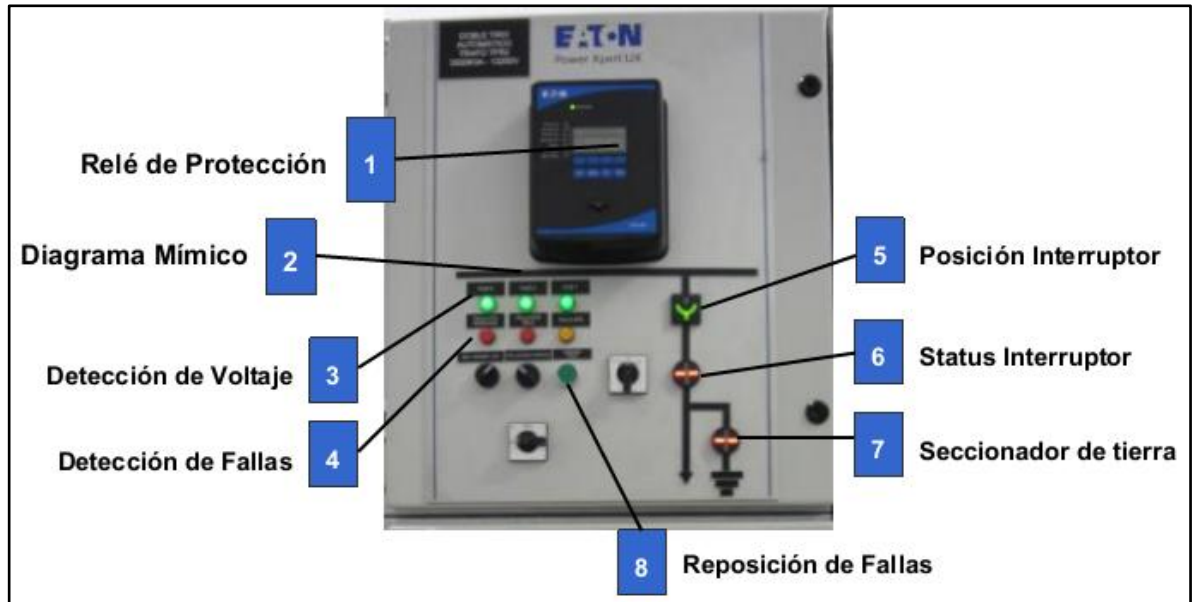


Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

La operación de las celdas está basada en un sistema automático de transferencia el cual cuenta con un sistema de instrumentos de medición, elementos de control y protección, además de elementos de indicación de status y posición. La Figura 18 presenta el diseño básico del compartimiento de bajo voltaje desde el cual se da la interacción directa entre el sistema de distribución y la lógica programada para la operación de la subestación bajo criterios de confiabilidad y flexibilidad para realizar maniobras automáticas para las transferencias entre fuentes, y a discreción cuando el sistema de producción autorice la reposición de fallas para evitar eventos no deseados a la hora de realizar maniobras que afecten el proceso

de producción. (Nota: En la sección “Automatismos Programados” se presenta la definición del funcionamiento de los elementos de mando y señalización del compartimiento de bajo voltaje para mayor claridad en la operación del sistema de transferencias).

Figura 18: Compartimiento de bajo voltaje. [01]



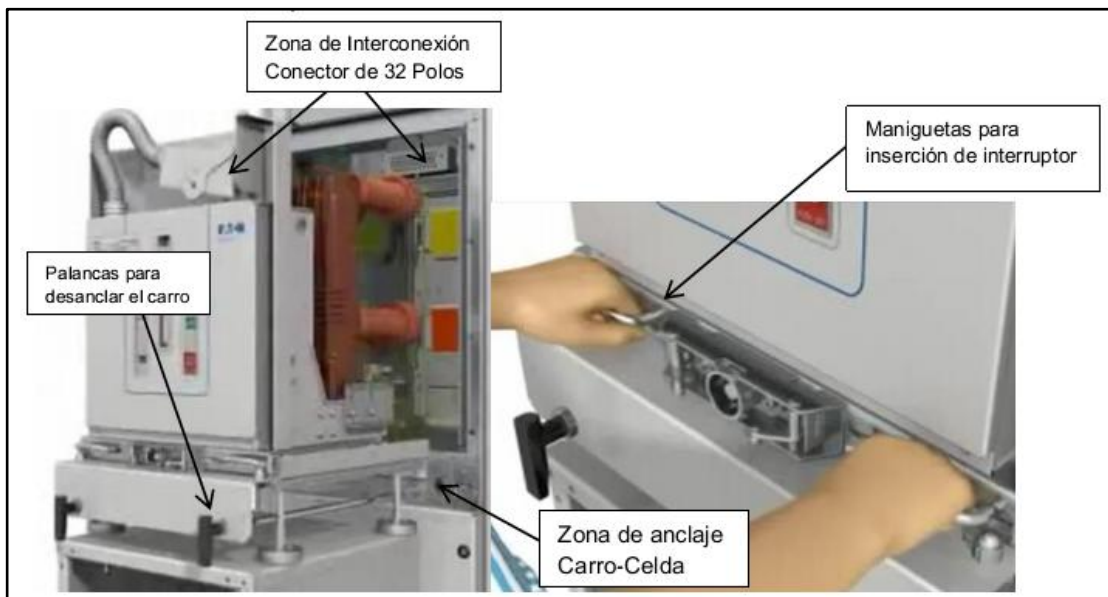
Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

### 6.1.1. Puesta en operación del sistema.

La inserción de los interruptores es el primer paso para la puesta en operación del sistema para la cual existen diferentes mecanismos con enclavamientos mecánicos, los cuales deben ser tenidos en cuenta para el correcto desempeño de las celdas. Para la inserción del interruptor de vacío W-Vac-i se cuenta con un carro de altura ajustable, el cual tiene anclaje de seguridad para formar una estructura firme con las celdas y el interruptor en posición de “inserción”. En la Figura 19 se presenta el mecanismo inicial utilizado para la inserción del interruptor, una vez el carro se encuentra anclado a la celda, las maniguetas en el interruptor permiten liberar el interruptor de la posición de “asegurado” en el carro,

para desplazarlo hacia el interior del compartimiento respectivo en la celda. Una vez se ha desplazado el interruptor hasta la celda, las maniguetas aseguran el interruptor al interior de la celda, se procede a fijar el conector de 32 polos del interruptor en la celda antes de cerrar la puerta para continuar con la inserción hasta que el interruptor quede conectado en posición de “servicio”. (Nota: El interruptor puede ser movido de la posición de “Desconectado” a la posición de “Servicio”, solamente cuando el seccionador de tierra está “Abierto”.)

Figura 19: Mecanismos de Inserción de interruptor – Desde el carro. [01]



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

En la Figura 20 se presenta el mecanismo de conexión del interruptor, para lo cual la puerta del compartimiento del interruptor debe estar cerrada, con los tornillos bien apretados. Tanto para la inserción como para el aseguramiento de las puertas se utilizan llaves especiales suministradas por “EATON”. Para realizar la inserción se gira la palanca en sentido horario hasta que el interruptor llegue al fondo de su compartimiento, verificando su posición mediante la señalización para

la posición del interruptor (Verde: Conectado, Rojo: Desconectado, X: En posición de prueba) en el compartimiento de bajo voltaje.

Figura 20: Mecanismo de conexión del interruptor – Con la puerta cerrada. [01]



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

### 6.1.2. Desconexión y apertura de celdas para inspección o mantenimiento.

La desconexión se realiza mediante el mismo mecanismo de inserción pero girando la palanca en sentido antihorario hasta que el indicador en el compartimiento de bajo voltaje indique la posición de desconectado (Posición interruptor --> Rojo: Desconectado). Así mismo la extracción del interruptor, se debe realizar utilizando el carro y asegurando el interruptor. Generalmente, para labores de inspección o mantenimiento se requiere acceder a la parte interior (compartimiento de cables) de las celdas, lo cual es posible si se extrae la bandeja que soporta el interruptor. La Figura 21 se observa cómo se realiza la extracción de la bandeja, para lo cual se debe haber extraído el interruptor con anterioridad, y luego se procede a la extracción de los transformadores de potencial para poder acceder al fondo de la celda en el compartimiento de cables donde se encuentran las conexiones de fuerza a inspeccionar. (Nota: Para abrir la puerta inferior se

requiere cerrar el seccionador de tierra debido a enclavamientos mecánicos presentes para seguridad del personal).



Figura 21: Extracción de bandeja del interruptor. [01]

## 6.2. PRECAUCIONES Y RECOMENDACIONES.

- De acuerdo a los enclavamientos definidos con anterioridad es necesario tener en cuenta que los mecanismos de seguridad no requieren de gran esfuerzo al momento de realizar las maniobras correspondientes a la inserción/extracción del interruptor y a la apertura/cierre del seccionador de tierra. Por lo tanto, se debe tener especial cuidado respecto a las maniobras con el seccionador de tierra, ya que se podría ocasionar daños irreversibles en los mecanismos por operaciones indebidas.
- La operación con el seccionador de tierra se realiza siempre hacia abajo, la cual cuenta con un torque realmente inferior al necesario para realizar la maniobra hacia arriba. En caso de presentar esfuerzos excesivos podría dañarse el mecanismo de seguridad, por lo que se debe verificar que las

puertas estén cerradas correctamente antes de realizar la maniobra de cierre/apertura del seccionador de tierra.

- En caso de presentarse problemas a la hora de insertar/extraer el interruptor de su compartimiento, verifique el estado del mismo y del seccionador de tierra. Para extraer el interruptor, éste y el seccionador de tierra deben estar abiertos.
- Para la apertura del seccionador de tierra asegúrese de girar la palanca hasta sentir el golpe seco, propio del seccionador. Esto es debido a que la señalización presente en el compartimiento de bajo voltaje es de índole informativa y podría indicar la apertura aun cuando la maniobra no se ha completado.

### **6.3. AUTOMATISMOS PROGRAMADOS.**

Las transferencias automáticas de la Subestación Principal MT de la Industria de Alimentos, tienen un diseño particular haciendo referencia a dos tipos de redes:

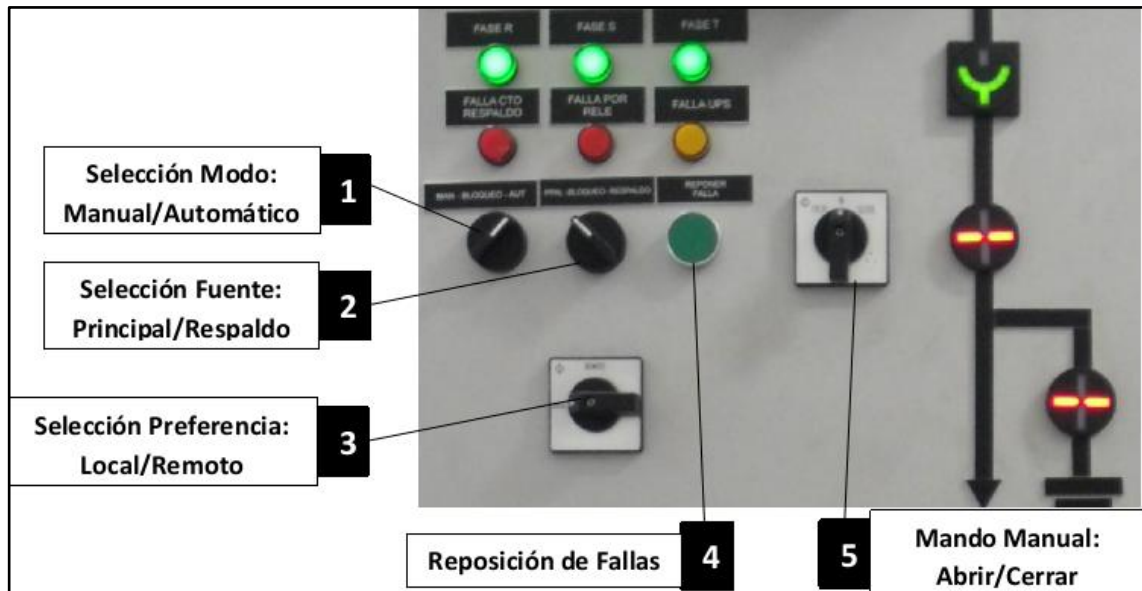
- Red Principal o Industrial con dos transformadores de 44,0/13,2 kV.
- Red de Respaldo o Residencial de 13,2 kV.
- Las transferencias de las celdas IJ y KL (Ver anexos Diagrama Unifilar) permiten hacer el cambio entre red principal y red de respaldo.
- La transferencia de las celdas AFB permiten seleccionar la fuente de alimentación de la red industrial: Transformador 1A (Antiguo) y/o Transformador 1B (Nuevo).

#### **6.3.1. Transferencias de las celdas IJ y KL.**

El sistema de transferencia ha sido programado de manera flexible de modo que las maniobras requeridas para cambiar entre fuentes y reponer fallas sea un procedimiento discrecional y efectivo. Existe la opción de seleccionar el modo de operación en el sistema: en MODO AUTOMÁTICO o MODO MANUAL utilizando el primer selector que se observa en la Figura 22, el cual permite e impide la

funcionalidad de los diferentes selectores: Fuente, Mando y Preferencia, que se encuentran en el panel de control de las Celdas “Power Xpert UX”.

Figura 22: Elementos de mando y señalización, Celdas J y K. [01]



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

Cuando el modo manual se encuentra activo es posible seleccionar la fuente deseada: Principal (Red Industrial 44,0 kV) o de Respaldo (Red Residencial 13,2 kV), y permite abrir o cerrar el interruptor de celda correspondiente, teniendo en cuenta que el sistema de transferencias tiene enclavamiento eléctrico (Ver anexos Diagramas de Control) para los interruptores que conforman cada transferencia, y no permitirá cerrar ambos interruptores simultáneamente, aun estando en modo manual. Cuando se activa el modo automático la preferencia corresponde a la red principal y no es posible manipular el estado del interruptor.

El pulsador de “Reposición de fallas” permite indicar al sistema de transferencia cuando es posible hacer el cambio de Red Residencial (13,2 kV) a Red Industrial (44,0 kV), de modo que las paradas en planta debidas a las transferencias, sean maniobradas a discreción. La reposición de fallas hace parte del modo automático,



por lo tanto, es importante verificar el modo de operación seleccionado al momento de realizar maniobras de este tipo.

El selector de preferencia “Local/Remoto” permite hacer “referencia” con la consola remota, instalada en la entrada de la subestación, dando prioridad a los elementos de mando remotos sobre los selectores presentes en el compartimiento de bajo voltaje de cada celda. De este modo, seleccionando la preferencia remota se ha de manipular el estado de cada interruptor de la subestación desde un panel que contiene todos los elementos de mando de cada celda independiente.

### **6.3.2. Transferencia en las celdas AFB.**

El automatismo programado para el triple tiro “AFB” permite la alimentación de dos cargas principales: “Presidencia y Generación”. Cada uno de los transformadores puede alimentar cada carga independientemente por medio del “**Selector de Fuente**”: TRF1A – AMBOS – TRF1B. Existe enclavamiento eléctrico que impide que el interruptor de acople F, se cierre cuando los interruptores principales A y B se encuentran cerrados, es decir, ambos transformadores no trabajan simultáneamente con ambas cargas, esto protege cada transformador en caso de que el sincronismo de fases entre ellos no sea idéntico, lo cual puede provocar daños graves en la subestación y en el sistema de distribución como tal.

### **6.3.3. Temporización de transferencias**

Cuando hay fallas en alguno de los transformadores el triple tiro actúa de modo que el transformador de respaldo alimente toda la carga de la planta, pero en este proceso se produce un corte de energía con un periodo de 2 segundos en la carga conectada al transformador afectado. Las fallas de cada transformador corresponden a los disparos: Relé Buchholz, Termómetro, válvula de sobrepresión y nivel de aceite mínimo (Nota: Dichas fallas solo pueden ser visualizadas desde el Sistema PQSCADA). El corte de energía se ve reflejado por la siguiente maniobra: apertura del interruptor que protege el transformador en falla, cierre del



interruptor de acople F. Cuando el transformador se repone de falla la maniobra a realizar es la siguiente: Apertura del interruptor de Acople y cierre de los interruptores principales (protección de cada transformador).

Cuando hay una falla de la red industrial, y la red domiciliaria está disponible, el sistema de transferencias realiza la siguiente maniobra: apertura de los interruptores principales, y espera de 2 minutos para el cierre de los interruptores de respaldo. Si la falla en la red industrial se restablece antes de 2 minutos, el sistema se restablece realizando el cierre de los interruptores principales. Si por el contrario, la falla en el circuito principal sobrepasa un periodo de 2 minutos, el sistema queda retenido en la red domiciliaria hasta que se reponga la falla a través del pulsador de “Reponer de falla” en las celdas J y K respectivamente.

#### **6.3.4. Detección de fallas y señalización.**

**Transferencias de las celdas IJ y KL:** Cuando el sistema de control automático de las transferencias detecta las fallas en el circuito se enciende el primer piloto de color rojo, si la falla corresponde a una protección de sobre-intensidad de corriente se enciende el segundo piloto de color rojo, y las fallas en la alimentación del circuito de control (UPS) se señalizan con el tercer piloto de color amarillo. Cada una de estas fallas se deben reponer externamente y el pulsador de reponer falla no tiene efecto en la solución de estas.


**Transferencia de las celdas AFB:** Cuando el sistema de control del triple tiro detecta fallas correspondientes a protecciones de sobre-intensidad de corriente o bajo voltaje, se debe reponer la falla a través del pulsador de “Reponer falla”. Las demás fallas, al igual que en las transferencias IJ y KL se deben reponer externamente, es decir, restableciendo las fallas directamente en el relé de protección, o solucionando el problema con la UPS si es el caso.

#### **6.4. RELÉS DE PROTECCIÓN: EDR-3000 Y FP4000/FP5000.**

Las protecciones habilitadas en cada relé de protección permiten dar orden de disparo directo al interruptor correspondiente indicando al PLC la falla, ya sea por sobre intensidad de corriente, bajo voltaje, o por corrientes de corto circuito, las cuales están programadas de acuerdo a la corriente nominal máxima que soporta cada transformador de 3500 kVA ( $I_N=153A$ ) y en base a la curva de disparo definida ANSI MINV (Moderadamente Inversa). Cuando ocurre una falla que pueda afectar el circuito, y ésta es detectada por el relé de protección, el interruptor se dispara, el relé de protección queda retenido y se debe hacer el restablecimiento de la falla directamente en el panel del relé de protección.

##### **6.4.1. Restablecimiento de fallas.**

Las **transferencias de las celdas IJ y KL** cuentan con relés de protección “EDR-3000” los cuales permiten la protección contra fallas en corriente, lo cual indica que el restablecimiento de fallas en dichos relés se realiza solo cuando ocurren fallas de sobrecorriente. Las fallas de bajo voltaje se reponen automáticamente cuando las condiciones de la fuente son normales. La Figura 23, presenta una descripción de las teclas utilizadas para el reconocimiento de fallas y el monitoreo.

- a. A través del sistema de LEDs es posible determinar la causa de las fallas, para hacer el reconocimiento de fallas por medio del botón “Ack/Rst” y desplazarse hasta el parámetro “TripCmd” presionar la tecla “

82



Figura 23: EDR-3000 - Elementos de Monitoreo y Reconocimiento de Fallas. [01]

b. Con el botón “Reset” es posible ingresar al sistema de reconocimiento de fallas, seleccionando el apartado “TripCommand” y presionando “Enter” se puede hacer el restablecimiento de fallas. Cuando se trata de alarmas que han quedado retenidas se selecciona el apartado “Alarm” y se presiona “Enter” sobre la línea “Reset All Alarms”.

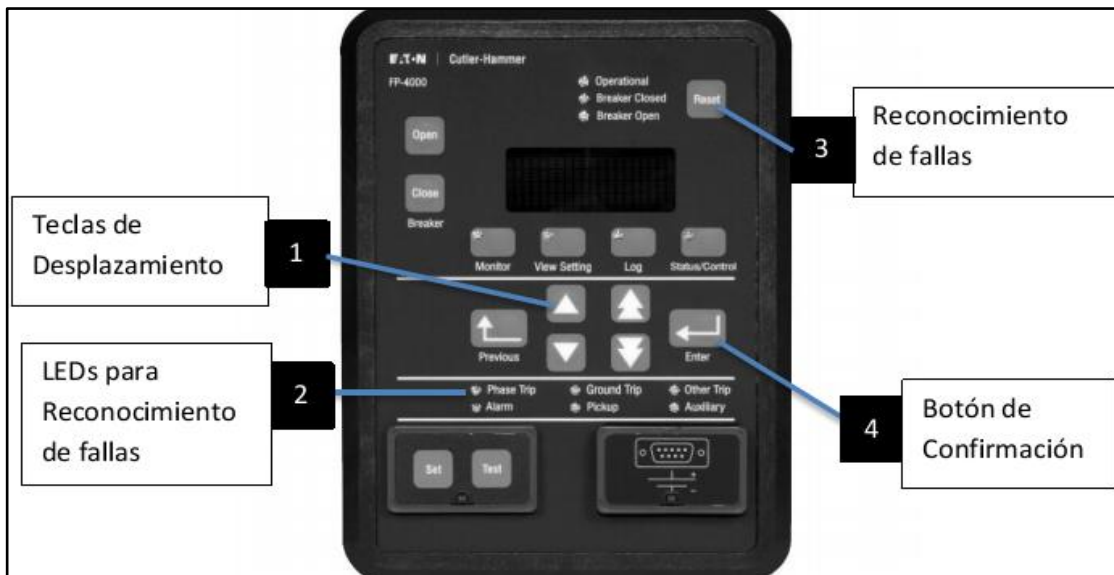


Figura 24: FP4000/FP5000 - Elementos de Monitoreo y Reconocimiento de Fallas. [01]

La **transferencia de las celdas AFB** estas celdas están disponible para proteger los transformadores mediante los relés FP4000 y FP5000 los cuales cuentan con protecciones de corriente y de voltaje. Estos relés de protección tienen mayores prestaciones debido a que son las protecciones principales para los transformadores. La Figura 24 presenta el esquema mencionado anteriormente para el reconocimiento de fallas referente a los relés de protección FP4000 y FP5000.

#### **6.4.2. Modo mantenimiento.**

El **modo mantenimiento** hace referencia a la protección hacia las personas que van estar en el lugar de las celdas o control automático, reduciendo el riesgo del arco eléctrico que puede causar quemaduras y/o incluso la muerte. En modo mantenimiento, los relés de protección se encargan de tomar acciones más rápidas en el instante de ocurrencia de cualquier tipo de falla, esto debido a que a menor tiempo de falla menor será la magnitud del arco eléctrico y permitirá mayor protección a las personas encargadas de realizar mantenimientos en la subestación sin desenergizar equipos en funcionamiento.

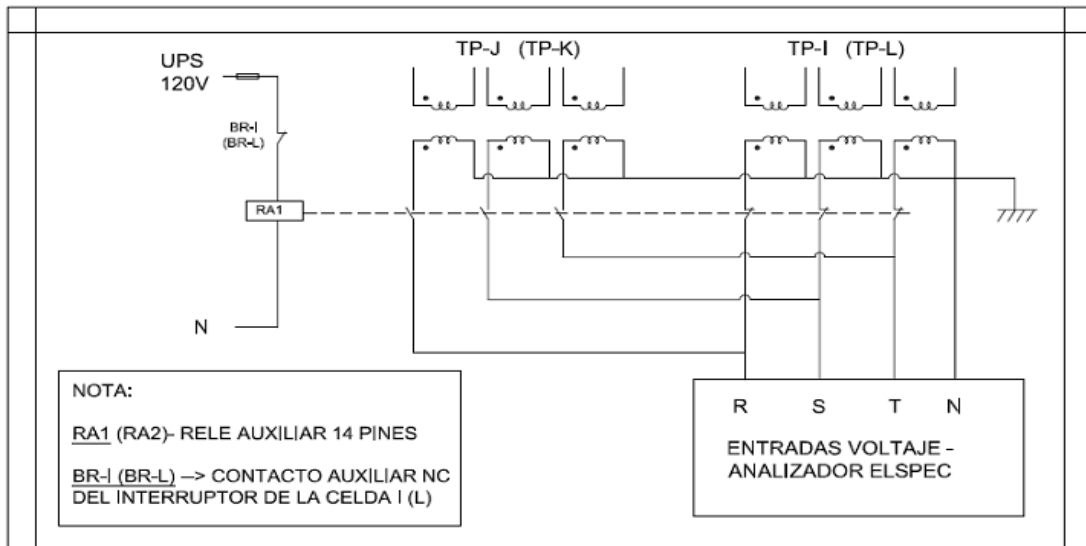
Cada relé de protección ha sido configurado con dos grupos de protección para dos aplicaciones diferentes: **Modo de Operación Normal** y **Modo Mantenimiento** (Resistencia al arco). A través de un selector ubicado en la consola es posible activar dicha característica en los relés de protección. Los EDR-3000 permiten visualizar la activación de dicha característica mediante el LED "Maint Mode". Del mismo modo los relés FP4000 y FP5000 permiten visualizar dicha señalización mediante el LED "Auxiliary"

## 6.5. CELDA DE MEDIDA

La celda de medida, está ubicado en las celdas DEQ ha sido adecuada para el registro de formas de onda por medio de conexión Ethernet a través de dos analizadores ELSPEC que realizan la medición de energía en cada carga, las cargas de los circuitos de presidencia y generación.

La Figura 25 muestra la conexión utilizada para las entradas de voltaje en el analizador de redes ELSPEC y la *Figura 015* del anexo muestra la ubicación. Se hace uso de un relé para realizar la medición sobre los TPs de acuerdo a la red en servicio: las celdas I y L (Red de 44,0 kV) o J y K (Red de 13,2 kV). Los contactos auxiliares NC (Normalmente Cerrado) de cada interruptor de las celdas I y L permiten controlar un relé auxiliar presente en la celda de medida para hacer el by-pass de las señales de medición.

Figura 25: Conexión de TPs en Celda de Medida (Analizadores ELSPEC). [01]



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

La conexión de los TCs en la celda de medida es exclusiva para la celda de medida gracias al doble devanado disponible en cada TC instalado en las celdas "Power Xpert UX". Por lo tanto, la medición de voltaje y corriente estará disponible

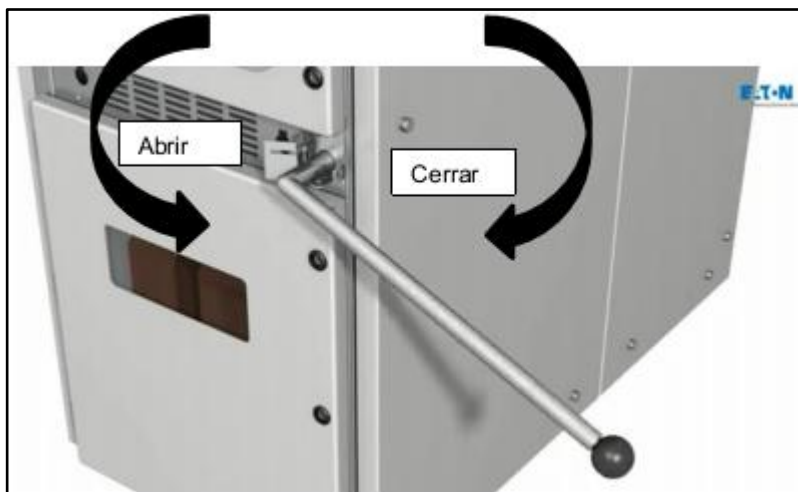
siempre de acuerdo al estado del interruptor principal correspondiente en cada celda de transferencia (IJ y KL).

## 6.6. ENCLAVAMIENTOS DE LOS SECCIONADORES.

La Figura 26 presenta el mecanismo utilizado para abrir/cerrar el seccionador (o cuchilla) de tierra de la celda “*Power Xpert UX*”, la maniobra en sentido horario permite cerrar el seccionador de tierra, y la maniobra en sentido antihorario permite abrir el seccionador una vez se encuentra puesto a tierra. Para realizar esta maniobra se deben tener en cuenta varios enclavamientos y seguridades recomendadas en esta sección.

La puerta del compartimiento solamente puede ser abierta cuando el interruptor se encuentra en posición de “desconectado”. Para la operación normal del circuito el interruptor debe estar en posición “conectado”.

Figura 26. Mecanismo de Apertura/Cierre seccionador de tierra. [01]

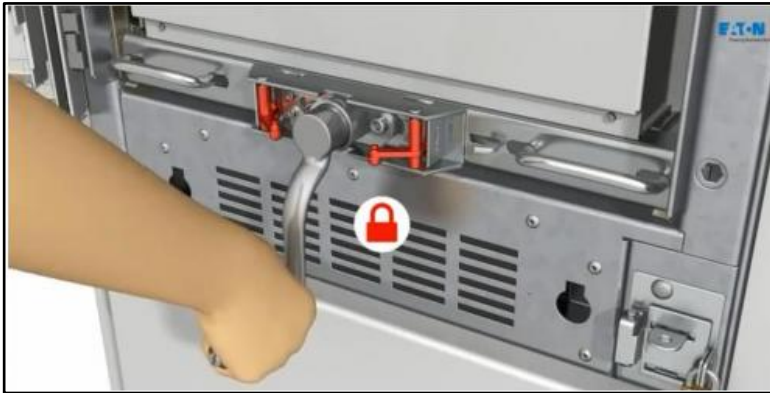


Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

Para la inserción/extracción del interruptor, la puerta debe estar cerrada y el interruptor abierto, esto se observa en la Figura 27. La puerta del compartimiento está mecánicamente “bloqueada” con el “carro” del interruptor de forma tal que la

puerta puede ser abierta solo cuando el “carro” está en posición de “Desconectado”.

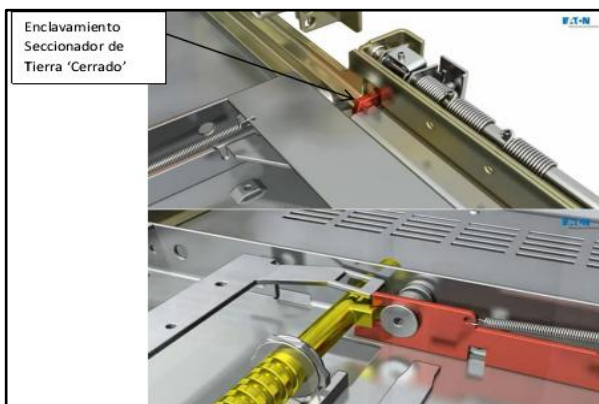
Figura 27. Enclavamiento de seguridad en la puerta del interruptor. [01]



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

Enclavamiento mecánico con el compartimiento del interruptor de manera que: El seccionador de tierra no puede ser “cerrado” con el interruptor en la posición de “Servicio o Conectado”. El interruptor puede ser movido solamente de la posición de “Desconectado” a la posición de “Servicio” cuando el seccionador de tierra está “Abierto”. En la Figura 28 se presentan los enclavamientos mencionados que impiden la inserción del interruptor cuando el seccionador de tierra se encuentra cerrado.

Figura 28. Enclavamientos de seguridad para la inserción del interruptor. [01]



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

La puerta de la parte inferior, que da acceso a los transformadores de potencial y al compartimiento de cables, tiene un mecanismo de enclavamiento con el seccionador de tierra de las Celdas “*Power Xpert UX*”, el cual proporciona seguridad a las personas en condiciones normales de operación. La Figura 29 presenta el primer enclavamiento en la puerta inferior cuando el seccionador de tierra se encuentra abierto. De este modo la puerta solo se puede abrir cuando el seccionador de tierra se encuentre cerrado.

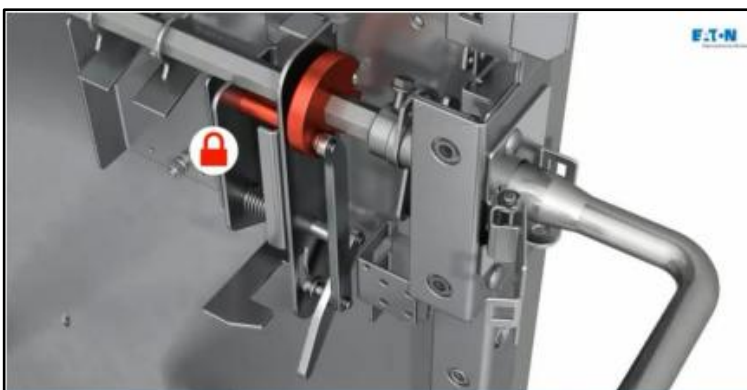
Figura 29. Enclavamiento mecánico – Seccionador de tierra abierto. [01]



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

Cuando la puerta inferior se encuentra abierta se cuenta con un enclavamiento mecánico adicional, orientado a su vez a la protección de personal, el cual impide que se abra el seccionador de tierra mientras la puerta se encuentre abierta. La Figura 30 presenta el enclavamiento correspondiente a este caso.

Figura 30. Enclavamiento mecánico – Puerta inferior abierta. [01]

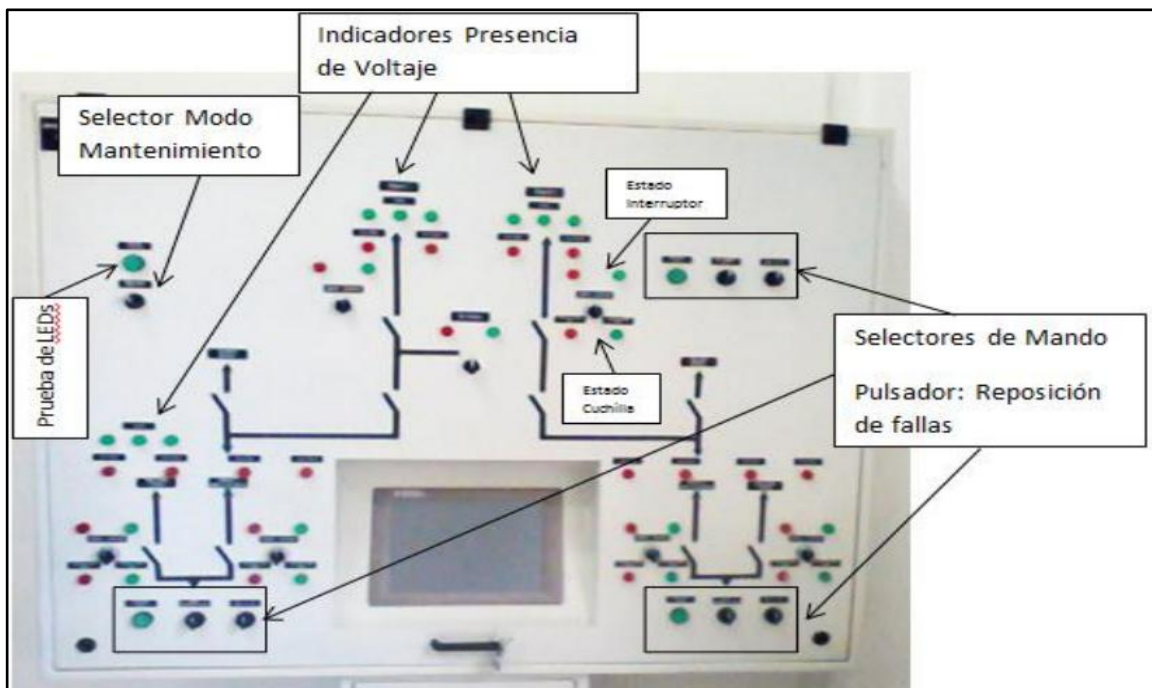




## 6.7. CONSOLA REMOTA EN LA SUBESTACIÓN PRINCIPAL

La consola remota, instalada a la entrada de la subestación principal, permite identificar cada componente de la subestación, mediante un mímico del diagrama unifilar, desde un monitor. De acuerdo a los automatismos programados se puede maniobrar cada una de las transferencias de la subestación principal, tanto desde cada celda como desde la consola remota, pero no es posible hacer esto simultáneamente. Para seleccionar el punto de mando de cada automatismo programado se encuentra el selector de posición: “Local/Remoto”, ubicado en la celda correspondiente, el cual da la preferencia a los accionamientos respectivos de la transferencia desde la celda local o desde la consola remota. Si se desea controlar los automatismos de la subestación desde la consola es necesario que dicho selector se encuentre en “Remoto”. Observe la Figura 31 para detallar cada componente de la consola.

Figura 31: Descripción Componentes Consola Remota. [01]



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

Los selectores de mando en cada sección de las celdas de transferencia (Transferencias IJ y KL) permiten configurar el modo de operación del sistema “manual/automático”, y la preferencia de la red “principal/respaldo”. Además el pulsador de color verde cumple la función de “reponer fallas”. En la consola se encuentra señalización de presencia de voltajes de cada fuente: Red Industrial 44,0 kV o Red Residencial 13,2 kV, en el caso del Triple Tiro en las celdas A-F-B hay señalización para cada transformador (TRF1A – TRF1B). Cuando el modo de operación se encuentra en “manual” es posible accionar los interruptores de cada celda, desde la consola, mediante un selector con retorno a centro (abrir/cerrar). Además es posible visualizar el estado de cada interruptor (abierto: rojo y cerrado: verde), y de cada seccionador de tierra (cuchilla).

Por último, el selector de modo mantenimiento, modifica el grupo de parámetros de cada relé de protección para que el sistema actúe con mayor rapidez en caso de presentarse una falla, lo cual está orientado a la protección de personas. De este modo la energía de arco eléctrico generada por una falla ha de ser eliminada en el menor tiempo posible.

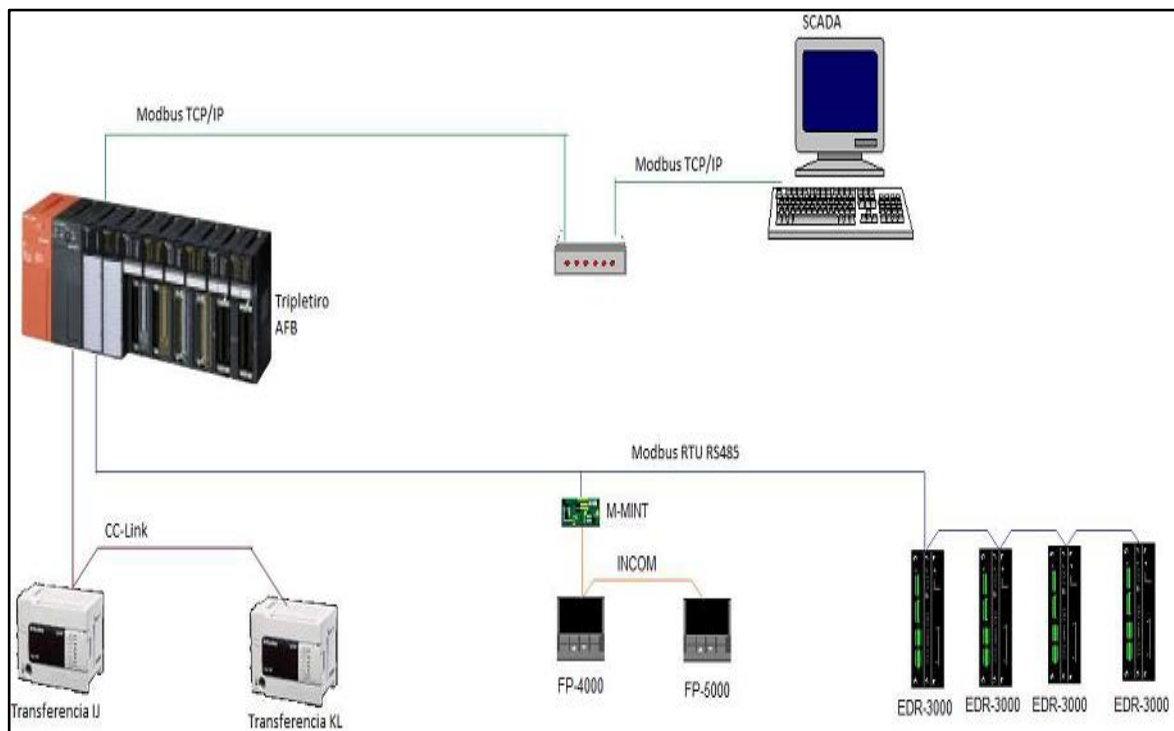
## **6.8. ARQUITECTURA DE COMUNICACIÓN**

El sistema de distribución de potencia eléctrica, basan su funcionamiento en la posibilidad de comunicación entre sus componentes, para tener un control automático. El sistema de comunicaciones cubre aspectos de diversa complejidad, ya que incluye cuestiones que van desde la conexión y direccionamiento de los mensajes hasta el formato en que se transmite el contenido de los mismos. En este informe se realiza una revisión de los sistemas de comunicaciones que dan soporte a la distribución de componentes de los sistemas distribuidos. La revisión se ha planteado desde dos puntos de vista: el de los aspectos teóricos de los paradigmas clásicos de comunicación y el de la visión práctica de los sistemas actuales de comunicación. El informe expone el sistema separadamente para

posteriormente unirlos conceptualmente y analizarlos desde una perspectiva global.

Muchas aplicaciones, especialmente las aplicaciones de tiempo real están centradas en los datos, o lo que es lo mismo, precisan recibir datos de diferentes fuentes, o distribuirlos a diferentes destinos. Por tanto las arquitecturas de comunicaciones como se muestra la Figura 32 donde los sistemas de control emplearán arquitecturas en esta subestación orientadas a distribuir datos

Figura 32. Arquitectura de comunicación. [01].



Fuente: Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

## **7. RECURSOS UTILIZADOS EN LA IMPLANTACIÓN**

### **7.1. RECURSOS HUMANOS**

Serán utilizados varias firmas de proveedores de servicios, tales como el personal especializado de OMC S.A., METALANDES, MITSUMO COLOMBIA S.A.S., GALVIS S.A y el personal técnico e ingeniero interno de la Industria de Alimentos.

### **7.2. RECURSOS TÉCNICOS**

En el centro de distribución de potencia eléctrica serán instaladas una serie de equipos tecnológicos para la optimización y confiabilidad del sistema eléctrico, como son:

- Un transformador de 3.5 MVA a 44,0/13,2 kV.
- Cincos interruptores de vacío.
- Tres celdas de remotes.
- Dos grupos de cuchillas seccionadoras con sus respectivos fusibles.
- Modificación de la estructura física del patio de transformadores.
- Reestructuración total del centro de potencia.
- Redistribución de las redes de alta tensión a las subestaciones secundarias.

### **7.3. RECURSOS ECONÓMICOS**

Para el presupuesto se contara con disposición de la siguiente forma sin detalles.

- Materiales: \$ 700 millones.
- Manos de obra: \$ 100 millones.

## 8. CONCLUSIONES

- Durante la etapa de planificación preliminar del sistema, antes de la selección de los equipos de distribución, varios sistemas de distribución fueron analizados y evaluados, incluyendo factores técnicos y económicos. Durante esta etapa, el tamaño de su complejidad se justifican, una revisión a fondo de cada sistema tanto en condiciones normales como en condiciones anormales.
- Los programas como el ELSPEC y el PQSCADA se identifica las corrientes de falla y las demandas en cualquier segmento de línea a fuente conectada al sistema de control automático.
- El software xSpider Versión 2.10.1 (Propiedad de "EATON") permitió realizar los cálculos de cortocircuito y las caídas de tensión en cada punto de la red eléctrica de la Industria de Alimentos.
- La optimización para el incremento de la capacidad del suministro de la potencia eléctrica a la planta, buscando una mejor maniobrabilidad, efectividad, seguridad y además mejorando la configuración de los elementos constitutivos para el centro principal de distribución de la potencia eléctrica en la Industria de Alimentos.
- La optimización generó necesidades de seguridad a la operación, con las protecciones instaladas de 5 interruptores en vacío para una mayor medida de protección de todas las cargas eléctrica alimentada desde la subestación principal.

- Se redujo la cantidad de energía radiada en el caso de un corto del fluido eléctrico implementado desde un control automático con las nuevas tecnologías instaladas y para una mejor confiabilidad y flexibilidad en la operación desde la subestación principal.
- La monitorización desde el software PQSCADA las fallas de corrientes y de voltajes en cada transformador cuando se produce un corte de energía de 2 segundos o sea los “flicker” ocasionada por fluctuaciones de tensión en la red eléctrica con la carga conectada al transformador afectado, son analizado para mejorar los tiempos de desconexión de los equipos de la planta que no alteren los procesos productivos.
- Las automatización del centro de distribución de potencia eléctrica permite las transferencias automáticas de la Subestación Principal de Media Tensión de la Industria de Alimentos, donde tiene un diseño particular haciendo referencia a dos tipos de redes: Red Principal con dos transformadores de 44,0/13,2 kV, una Red de Respaldo de 13,2 kV, las transferencias de las celdas IJ y KL que permiten hacer el cambio entre red principal y red de respaldo, la transferencia de las celdas AFB que permiten seleccionar la fuente de alimentación de la red industrial: Transformador 1A (Antiguo) y/o Transformador 1B (Nuevo).
- Para las fallas en la red industrial, y en la red residencial, el sistema de transferencias realiza la siguiente maniobra: apertura de los interruptores principales, y espera de 2 minutos para el cierre de los interruptores de respaldo. Si la falla en el circuito industrial sobrepasa un periodo de 2 minutos, el sistema queda retenido en la red residencial hasta que se reponga la falla en las celdas J y K respectivamente.

- Las medidas adecuada para el registro de formas de onda por medio de conexión Ethernet a través de dos analizadores ELSPEC que realizan la medición de energía en las cargas de los circuitos de presidencia y generación.
- La eficiencia energética en cuanto a la electricidad sólo puede expresarse en términos de mediciones físicas fundamentales: tensión, corriente, armónicos, etc. Estas mediciones físicas se registran y se analizan desde el punto de vista de calidad de la potencia y posteriormente se determinan estudios de eficiencia energética.
- Para poder realizar la determinación de las protecciones se debe de realizar el cálculo de cortocircuito en cada una de las subestaciones del sistema eléctrico para de esta forma seleccionar la protección adecuada, el ajuste de estas protecciones está determinado por la capacidad y el comportamiento de los equipos e instalaciones del sistema eléctrico, por lo que se debe de considerar todas las condiciones de operación, temporales y permanentes.

## 9. REFERENCIAS

### 9.1. Bibliográficas

[01] Documentación de la Industria de Alimentos. Medellín 2013.

[02] Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas adoptado por Colombia, RETIE, Resolución N° 18 XX, Modificación 2013.

[03] Norma Técnica Colombiana, NTC.

[04] Documentación y software de EATON.

[05] Green Switching - Opportunity to avoid SF<sub>6</sub> emission from electrical networks. W. Porte & G.C. Schoonenberg. Affiliation Eaton Electric B.V.

[06] Intelligent MV Circuit Breakers with integrated protective relays. James Benke, Eaton. June 6, 2005.

[07] Arc flash hazard assessment in the mining industry. M. Hopper, N. Wright, C. Ivany. Copyright material IEEE. Paper No. ESW2011-26.

[08] Estudio de optimización de un sistema de tracción eléctrica. Marco Pascual, 2010.

[09] IEEE Standard C37.48.1 "IEEE Guide for the Operation, Classification, Application, and Coordination of Current Limiting Fuses with Rated Voltages 138 kV".



## 9.2. Infografías, Cibergráficas y páginas web

[01W] [www.epm.com](http://www.epm.com)

[02W] <http://www.eaton.com/Eaton/index.htm>

[03W] <http://www.schneider-electric.com/site/home/index.cfm/es/>

[04W] <http://www.schneider-electric.com.ar/documents/recursos/cuadernostecnicos/ct1581.pdf>

[05W] <http://www.nfpa.org/>

[06W] <http://es.wikipedia.org/wiki/Transformador>

[07W] [http://www.asifunciona.com/tablas/transformadores/simb\\_transf.htm](http://www.asifunciona.com/tablas/transformadores/simb_transf.htm)

[08W] <http://www.nichese.com/trans-auto.html>

[09W] [http://patricioconcha.ubb.cl/transformadores/pagina\\_n1.htm](http://patricioconcha.ubb.cl/transformadores/pagina_n1.htm)

[10W] <http://www.cooperpower.com/Library/pdf/R240914.pdf>

[11W] [http://www.bticino.com.pe/0/pdf/GUIATECNICA\\_2.pdf](http://www.bticino.com.pe/0/pdf/GUIATECNICA_2.pdf)

[12W] <http://www.pronutec.com/html/cast/productos/pdf/HH%20castellano.pdf>

## 10. ANEXOS

DATOS TÉCNICOS DE LOS TRANSFORMADORES DE LAS DIEZ SUBESTACIONES<sup>6</sup>.

DIAGRAMA UNIFILAR DE LA SUBESTACIÓN PRINCIPAL DE LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS.

CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE LAS CELDAS DE TRANSFERENCIAS AUTOMÁTICAS EN LA SUBESTACIÓN PRINCIPAL.

DIAGRAMA UNIFILAR DE LAS CELDAS DE TRANSFERENCIAS AFB.

DISTRIBUCIÓN DE LAS CARGAS DEL FLUJO ELÉCTRICO EN LAS DIEZ SUBESTACIONES.

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE ENERGÍA

RESUMEN DE MEDICIONES PROMEDIO DE VOLTAJES, CORRIENTES Y FACTOR DE POTENCIA DE ALGUNAS SUBESTACIONES.

DEMANDA Y CONSUMO DE ENERGÍA EN LAS SUBESTACIONES.

TRANSFORMADORES DE LA SUBESTACIÓN PRINCIPAL

LOS MEDIDORES DEL SISTEMA ELSPEC

CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA Y EL CONTROL AUTOMÁTICO

SISTEMA DE UNIDADES.

---

<sup>6</sup> Datos suministrados por la Industria de Alimentos. 2013.

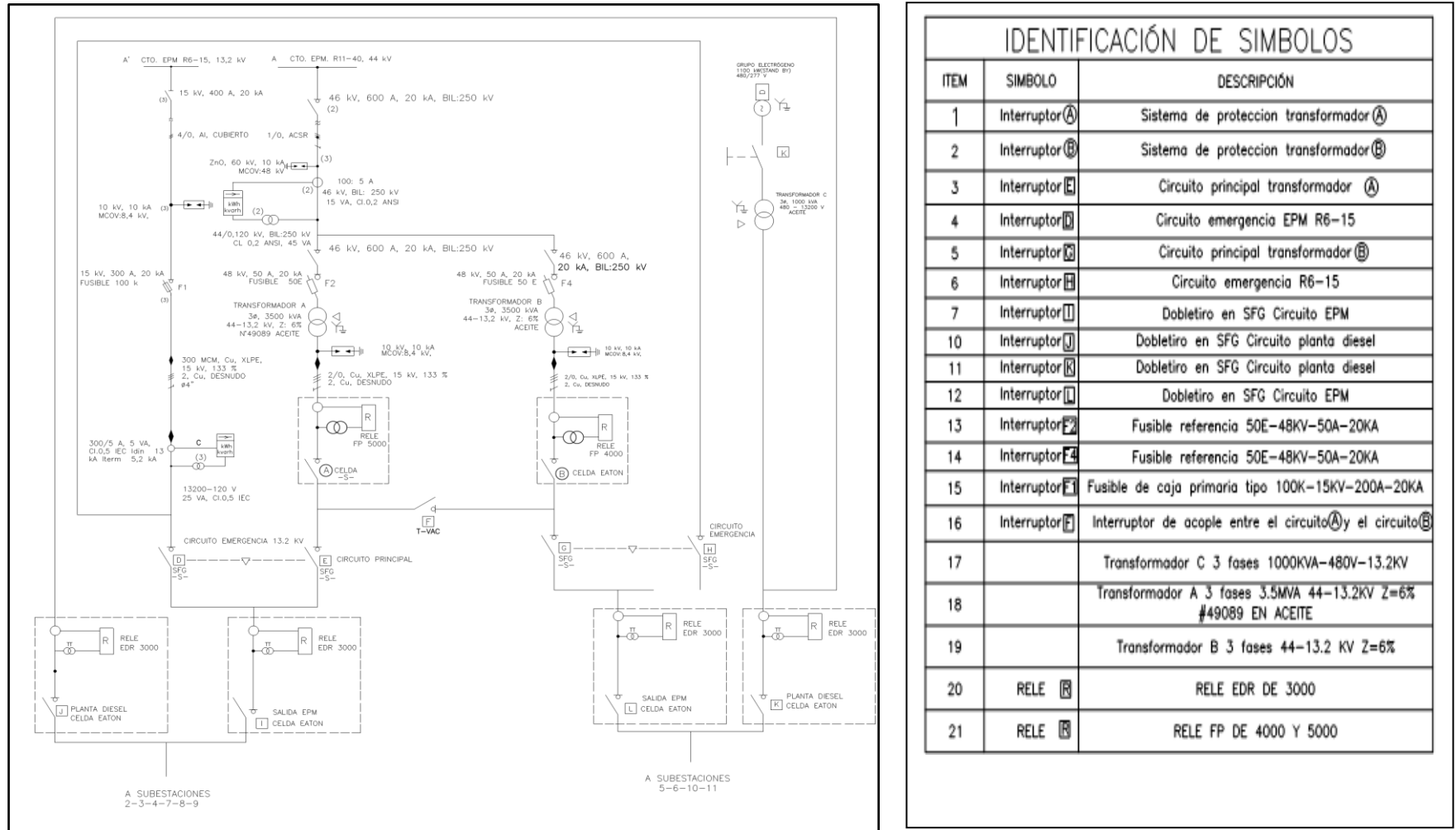
Anexo A. Datos Técnicos De Los Transformadores De Las Diez Subestaciones

DATOS TÉCNICOS DE LOS TRANSFORMADORES - ZENÚ.		TRANSFORMADOR S/E Nº1A (ANTIGUO)	TRANSFORMADOR S/E Nº1B (NUEVO)	TRANSFORMADOR S/E Nº2	TRANSFORMADOR S/E Nº3	TRANSFORMADOR S/E Nº4	TRANSFORMADOR S/E Nº5	TRANSFORMADOR S/E Nº6	TRANSFORMADOR S/E Nº7	TRANSFORMADOR S/E Nº8	TRANSFORMADOR S/E Nº9	TRANSFORMADOR S/E Nº10
CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS
MARCA		SIERRA	SUNTEC	SUNTEC	SUNTEC	SUNTEC	TESLA	SIERRA	SUNTEC	EBG	SIERRA	SIERRA
TIPO		OTHV3	OTHV3	DTHV3	DTHV3	DTHV3	TTSH	OTHV3	CRHV3	R17T3D	OTHV3	OTHV3
SERIE		5772046	58670112	22440109	8984011	22430109	3370908	5817018	41990111	E52012.1	6955077	6916067
AÑO DE FABRICACIÓN		1996	2012	2009	2005	2009	2008	200...	2011	2012	1997	1997
NORMAS		ICONTEC	NTC	NTC 3654	NTC 3654-2000	NTC 3654	NTC	ICONTEC	IEC 60076-11		ICONTEC	ICONTEC
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO		ONAN	ONAN	SECO ABIERTO	SECO ABIERTO	SECO ABIERTO	SECO ABIERTO	ONAN	SECO ENCAPSULAD	SECO ENCAPSULAD	ONAN	ONAN
MATERIAL DEVANADOS		COBRE	COBRE	COBRE	COBRE	COBRE	COBRE	COBRE	COBRE	COBRE	COBRE	COBRE
POTENCIA NOMINAL (CAPACIDAD)	kVA	3500	3500	600	500	1000	800	1250	1600	1600	1250	800
AUMENTO TEMP ACEITE/DEVANADOS	°C		60/65	125	125	125	125		100	100		
FRECUENCIA NOMINAL	Hz	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
NUMERO DE FASES		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
GRUPO DE CONEXIÓN		Dyn5	Dyn5	Dyn5	Dyn5	Dyn5	Dyn5	Dyn5	Dyn5	Dyn11	Dyn5	Dyn5
CLASE DE AISLAMIENTO		Ao		H	H	H	H	Ao	F/F		Ao	Ao
TIPO DE LIQUIDO AISLANTE		ACEITE MINERAL	ACEITE MINERAL	N/A	N/A	N/A		ACEITE MINERAL	RESINA EPÓXICA	RESINA EPÓXICA	ACEITE MINERAL	ACEITE MINERAL
VOLUMEN LIQUIDO AISLANTE	Lts	3686	2838	N/A	N/A	N/A		924	N/A	N/A	646	544
PESO LIQUIDO AISLANTE	kg		2463	N/A	N/A	N/A			N/A	N/A		
PESO PARTE ACTIVA	kg		9290									
PESO TOTAL	kg	10826	9290	1780	1500	2500	1990	3992	3000	3860	3412	2436
IMPEDANCIA AT-BT (kVA)	%	6.55 (3500 kVA)	6.26 (3500 kVA)	5.52 (600 kVA)	5.31 (500 kVA)	6.01 (1000 kVA)	5.57 (800 kVA)	6.29 (1250 kVA)	8.25 (1600 kVA)	5.50 (1600 kVA)	5.94 (1250 kVA)	4.24 (800 kVA)
I <sub>cc</sub> SIMÉTRICA AT/BT	kA	2.23	0.7340/2.3700					50.3	0.848/24.33		25.31	22.60

DATOS TÉCNICOS DE LOS TRANSFORMADORES - ZENÚ.		TRANSFO RMADOR S/E Nº1A (ANTIGU O)	TRANSFO RMADOR S/E Nº1B (NUEVO)	TRANSFO RMADOR S/E Nº2	TRANSFO RMADOR S/E Nº3	TRANSFO RMADOR S/E Nº4	TRANSFO RMADOR S/E Nº5	TRANSFO RMADOR S/E Nº6	TRANSFO RMADOR S/E Nº7	TRANSFO RMADOR S/E Nº8	TRANSFO RMADOR S/E Nº9	TRANSFO RMADOR S/E Nº10
DURACIÓN DEL CORTOCIRCUITO (MAX)	seg	2	2					2	2	2	2	2
PRESIÓN/VACÍO	kgf/cm <sup>2</sup>		65									
TEMPERATURA AMBIENTE MÁXIMA	°C	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
ALTITUD DE DISEÑO	msn m	1000	1000					1000	1000	1000	1000	1000
FACTOR DE SERVICIO			1.0	1.0	1.0	1.0			1.0			
FACTOR K ARMÓNICOS									1.0			
ALTA TENSIÓN		U-V-W	U-V-W	H1-H2-H3	H1-H2-H3	H1-H2-H3	U-V-W	U-V-W	1U-1V-1W	U-V-W	U-V-W	U-V-W
SERIE / NBA	kV		52 /250	15/60	15/60	15/60	15/60		17.5/95.0	17.5/35.0/95.0		
TENSIÓN NOMINAL	V	44000	44000	13200	13200	13200	13200	13200	13200	13200	13200	13200
CORRIENTE NOMINAL	A	45.9	45.9	26.2	21.8	43.7	34.99	54.6	70.0		54.67	34.90
BAJA TENSIÓN		X-Y-Z / Pn	X-Y-Z / Pn	X1-X2-X3 / X0	X1-X2-X3 / X0	X1-X2-X3 / X0	X-Y-Z / Pn	X-Y-Z / Pn	2u-2v-2w / 2n	X-Y-Z / Pn	X-Y-Z / Pn	X-Y-Z / Pn
SERIE / NBA	kV		15 / 95	1.1 / --	1.1 / --	1.1 / --			1.1 / --	1.1 /3.0/ --		
TENSIÓN NOMINAL	V	13800/7967	13600/7852	228/132	228/132	228/132	226/125	228/132	460/266	460/--	480/277	480/277
CORRIENTE NOMINAL	A	146.4	148.6	1519	1266.1	2532	2138.4	3165.3	2008.2	2008	1503.5	962.2

Tabla 001. DATOS TÉCNICOS DE LOS TRANSFORMADORES DE LAS DIEZ SUBESTACIONES - Industria de Alimentos. 2013.

## Anexo B. Diagrama Unifilar De La Subestación Principal De La Industria De Alimentos.



IDENTIFICACIÓN DE SIMBOLOS		
ITEM	SIMBOLO	DESCRIPCIÓN
1	Interruptor Ⓐ	Sistema de proteccion transformador Ⓐ
2	Interruptor Ⓑ	Sistema de proteccion transformador Ⓑ
3	Interruptor Ⓒ	Circuito principal transformador Ⓐ
4	Interruptor Ⓓ	Circuito emergencia EPM R6-15
5	Interruptor Ⓔ	Circuito principal transformador Ⓑ
6	Interruptor Ⓕ	Circuito emergencia R6-15
7	Interruptor Ⓖ	Dobletiro en SFG Circuito EPM
10	Interruptor Ⓙ	Dobletiro en SFG Circuito planta diesel
11	Interruptor Ⓚ	Dobletiro en SFG Circuito planta diesel
12	Interruptor Ⓛ	Dobletiro en SFG Circuito EPM
13	Interruptor Ⓜ	Fusible referencia 50E-48KV-50A-20KA
14	Interruptor Ⓨ	Fusible referencia 50E-48KV-50A-20KA
15	Interruptor Ⓩ	Fusible de caja primaria tipo 100K-15KV-200A-20KA
16	Interruptor ⓐ	Interruptor de acople entre el circuito Ⓐ y el circuito Ⓑ
17		Transformador C 3 fases 1000KVA-480V-13.2KV
18		Transformador A 3 fases 3.5MVA 44-13.2KV Z=6% #49089 EN ACEITE
19		Transformador B 3 fases 44-13.2 KV Z=6%
20	RELE Ⓡ	RELE EDR DE 3000
21	RELE Ⓢ	RELE FP DE 4000 Y 5000

Figura 001: Diagrama unifilar detallado de la subestación principal de la Industria de Alimentos.

Anexo C. Centro De Distribución De Las Celdas De Transferencias Automáticas En La Subestación Principal

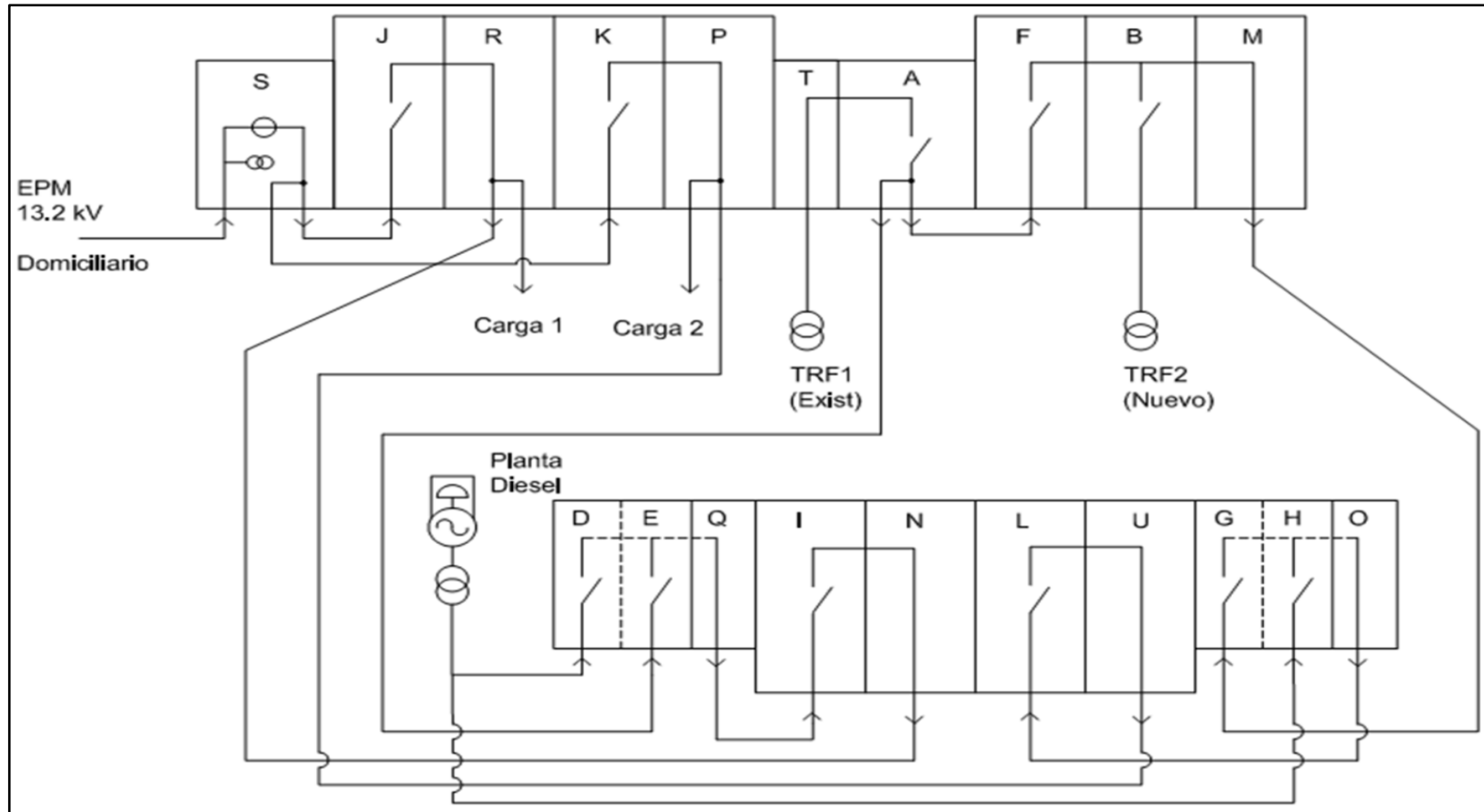


Figura 002: Diagrama unifilar del centro de distribución de las celdas de transferencias automáticas en la Subestación Principal MT de la Industria de Alimentos

Anexo D. DIAGRAMA UNIFILAR DE LAS CELDAS DE TRANSFERENCIAS AFB.

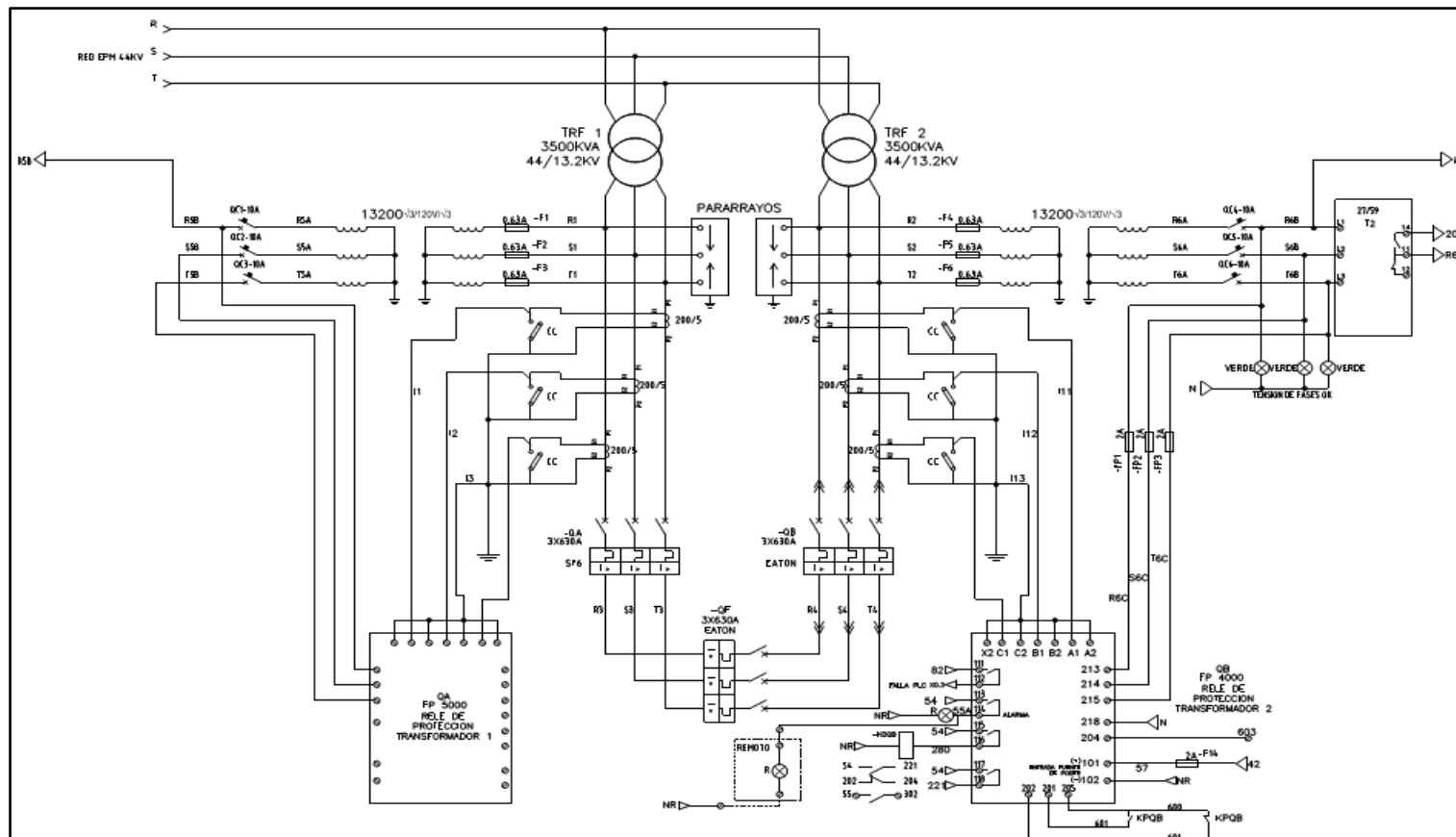


Figura 003: Diagrama unifilar de las celdas de transferencias AFB, de la Industria de Alimentos.

## Anexo E. Distribución De Las Cargas Del Flujo Eléctrico En Las Diez Subestaciones.

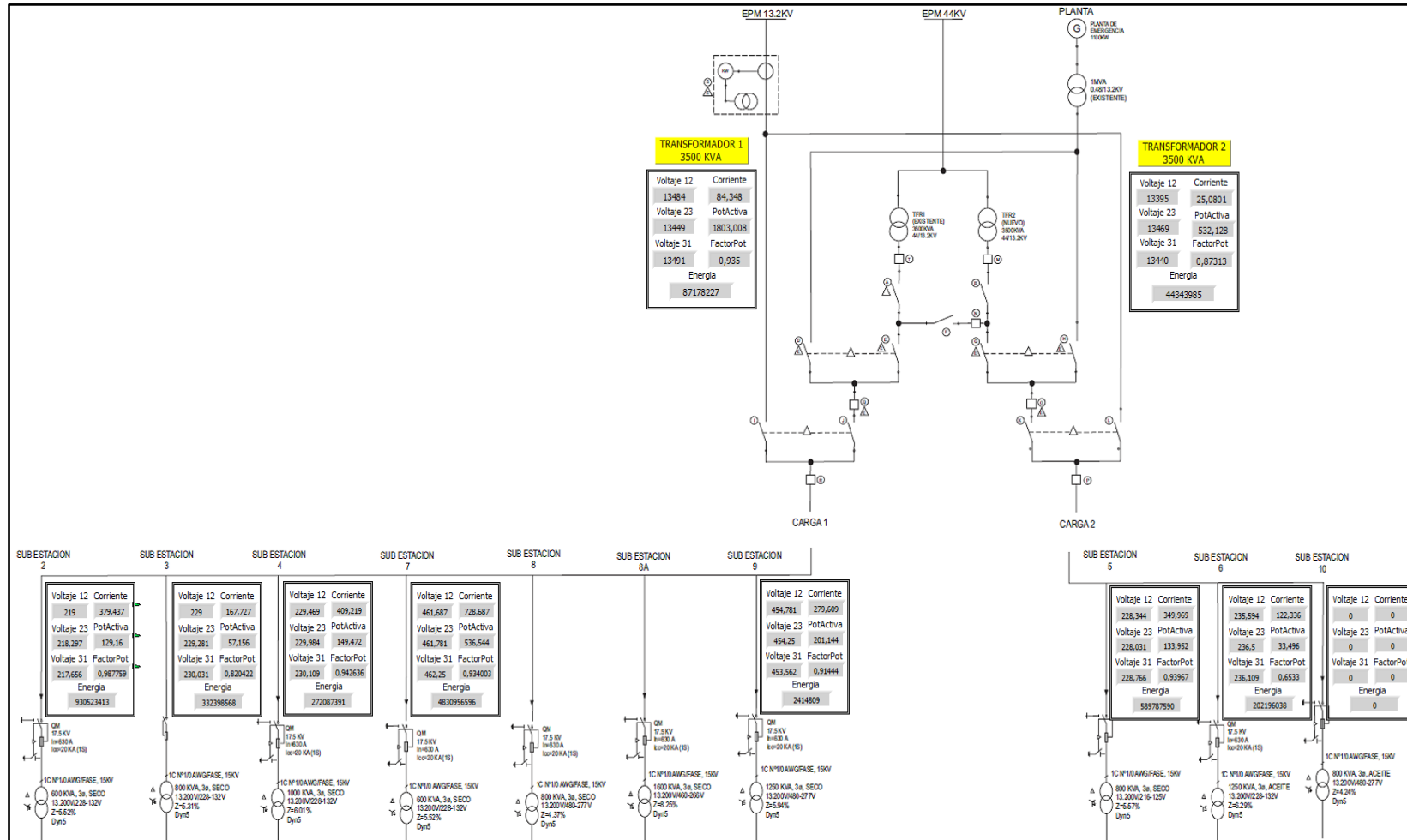
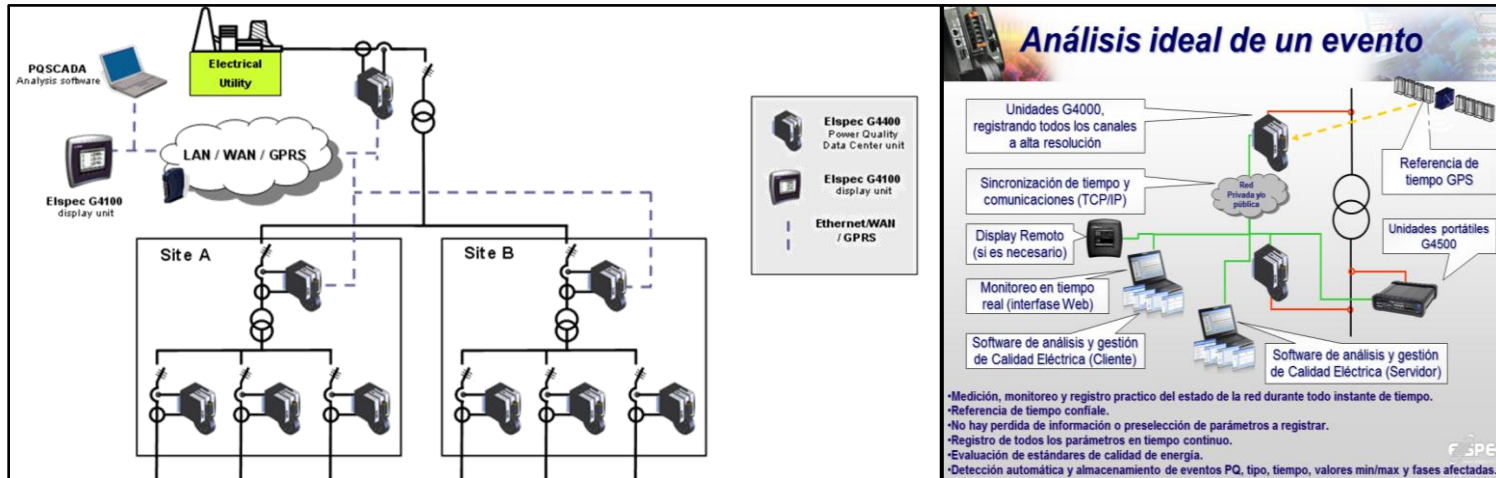


Figura 004: Distribución de las cargas y demanda del flujo eléctrico en las diez subestaciones, de la Industria de Alimentos.



## Anexo F. Sistema de Gestión de la Calidad de Energía **Software Elspec**



### Elspec G4420

- Almacenamiento continuo por más de 1 mes
- Todas las lecturas a una resolución de 512 muestras por ciclo
- Formato de compresión PQZIP desarrollado por Elspec compresión típica 1000:1
- Exactitud superior al 0.1%
- 2 cálculos paralelos: IEC 61000-4-30 y ciclo a ciclo
- Medición de armónicos hasta el 25<sup>º</sup>
- Prueba de cumplimiento de estándares de calidad de energía EN 50160, IEC 61000-4-15, NVE, CREG 024 y otros.
- Elaboración de informes de calidad de energía
- Medición de flicker
- Almacenamiento periódico de energía en los cuatro cuadrantes
- Muestreo **simultáneo** a 512 muestras por ciclo en 12 canales (4 de corriente, 5 de tensión y 3 de temperatura)
- Ranura de expansión compact flash (por ejemplo para utilización de módulo GPS)
- 2 Puertos Ethernet (10/100 MBit) con tecnología PoE (Power over Ethernet, alimentación por medio del cable de red)
- Servidor web incorporado para monitoreo remoto en tiempo real y configuración de la unidad usando un browser convencional (Internet Explorer, Mozilla, Opera, etc.)
- Dos servidores OPC incorporados para integración con sistemas SCADA
- Todos los parámetros son almacenados, no es necesario seleccionar parámetros
- Puertos USB y RS-485
- Estructura de hardware sólida que permite inclusión de funciones vía actualización de firmware de la unidad

### Elspec G4420

Medición en tiempo real	ELSPEC G4420
Muestreo, muestras por ciclo	512
Medición de armónicos hasta	25 <sup>th</sup>
Mediciones ciclo a ciclo de valores RMS, Frecuencia y armónicos	SI
Medición de sobrecargas (desde el nominal nominal)	x10
Convertor analógico a digital	16/20 <sup>º</sup> bit
<b>Almacenamiento de información</b>	
Memoria interna	2GB
Límite de firmware para captura continua de información	1 Mes
<b>Análisis de calidad de energía</b>	
Detección de transientes, microsegundos (60Hz)	32,5
Flicker (IEC 61000-4-15)	SI
Prueba de cumplimiento de estándares EN50160, CREG, NVE, otros	SI
<b>Puertos</b>	
Puertos Ethernet	2
Power Over Ethernet (PoE) - in, out	SI
RS-485/422	SI
USB	SI
Compact Flash (CF)	SI
Alimentación de respaldo después de desenergización (ultracapacitores)	25 seg.
Servidor OPC (Open Connectivity)	SI
OPC Gateway: otros RS-485/422 via OPC	SI

Figura 005: Las características del sistema ELSPEC - Industria de Alimentos. **SOFTWARE ELSPEC G4420**

Anexo G. Software Elspec G4420

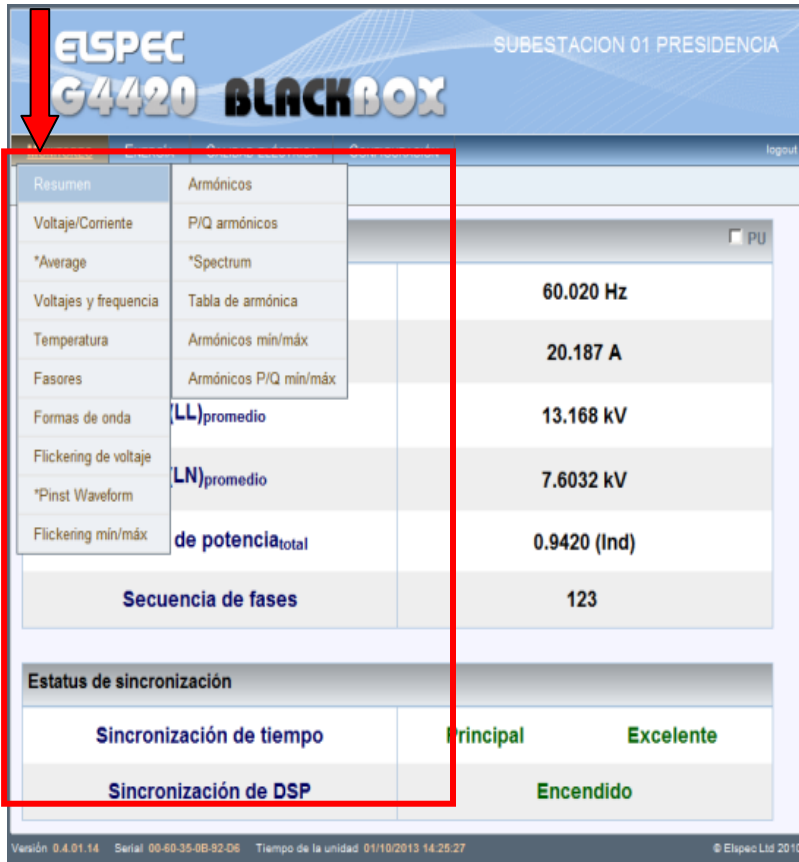


Figura 006: Los análisis y mediciones que ofrece el sistema ELSPEC - Industria de Alimentos.

ELSPEC G4420 BLACKBOX SUBESTACION 01 PRESIDENCIA

MONITOREO ENERGÍA CALIDAD ELÉCTRICA CONFIGURACIÓN

US ■ MONITOREO »

Resumen

Frecuencia	60.024 Hz
I <sub>promedio</sub>	20.838 A
V(LL) <sub>promedio</sub>	13.168 kV
V(LN) <sub>promedio</sub>	7.6027 kV
Factor de potencia <sub>total</sub>	0.9393 (Ind)
Secuencia de fases	123

Estatus de sincronización

Sincronización de tiempo	Principal	Bueno
Sincronización de DSP	Encendido	

Versión 0.4.01.14 Serial 00-60-35-0B-92-D6 Tiempo de la unidad 01/10/2013 14:27:39 © Elspec Ltd 2010

ELSPEC G4420 BLACKBOX SUBESTACION 01 PRESIDENCIA

MONITOREO ENERGÍA CALIDAD ELÉCTRICA CONFIGURACIÓN

US ■ MONITOREO » RESUMEN

Resumen

Frecuencia	
I <sub>promedio</sub>	
V(LL) <sub>promedio</sub>	
V(LN) <sub>promedio</sub>	
Factor de potencia <sub>total</sub>	0.9315 (Ind)
Secuencia de fases	123

Estatus de sincronización

Sincronización de tiempo	Principal	Bueno
Sincronización de DSP	Encendido	

Versión 0.4.01.14 Serial 00-60-35-0B-92-D6 Tiempo de la unidad 01/10/2013 14:27:52 © Elspec Ltd 2010

Figura 007: Los análisis y mediciones que ofrece el sistema ELSPEC - Industria de Alimentos.

## Anexo H. Resumen De Mediciones Promedio De Voltajes, Corrientes Y Factor De Potencia De Algunas Subestaciones.

Subestacion	Frecuencia	Corriente Promedio	V(L-L) Promedio	V(L-N) Promedio	Factor de potencia total	Secuencia de fases
SUBESTACION 1 GENERACI...	60.014 Hz	75.977 A	13.358 kV	7.7121 kV	0.9492 (Ind)	123
SUBESTACION 01 PRESIDEN...	60.020 Hz	26.756 A	13.170 kV	7.6045 kV	0.9504 (Ind)	123
SUBESTACION 2 - G4420	60.014 Hz	411.76 A	216.24 V	124.85 V	0.9889 (Ind)	132
SUBESTACION 3 - G4420	60.022 Hz	64.304 A	228.54 V	131.95 V	0.8557 (Ind)	132
SUBESTACION 4 - G4420	60.020 Hz	390.21 A	227.50 V	131.34 V	0.8790 (Ind)	123
SUBESTACION 5 - G4420	60.014 Hz	288.98 A	225.80 V	130.36 V	0.9333 (Ind)	123
SUBESTACION 6 - G4420	60.014 Hz	95.510 A	233.52 V	134.82 V	0.9895 (Cap)	123
SUBESTACION 7 - G4420	59.987 Hz	834.41 A	456.91 V	263.80 V	0.9319 (Ind)	123
SUBESTACION 9 - G4420	60.020 Hz	487.21 A	458.44 V	264.68 V	0.9321 (Ind)	123
SUBESTACION 10 - G4420	60.020 Hz	560.64 A	461.66 V	266.55 V	0.9499 (Ind)	132

Figura 008: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC en la subestaciones - Industria de Alimentos.

Anexo I. Demanda Y Consumo De Energía En Las Subestaciones.

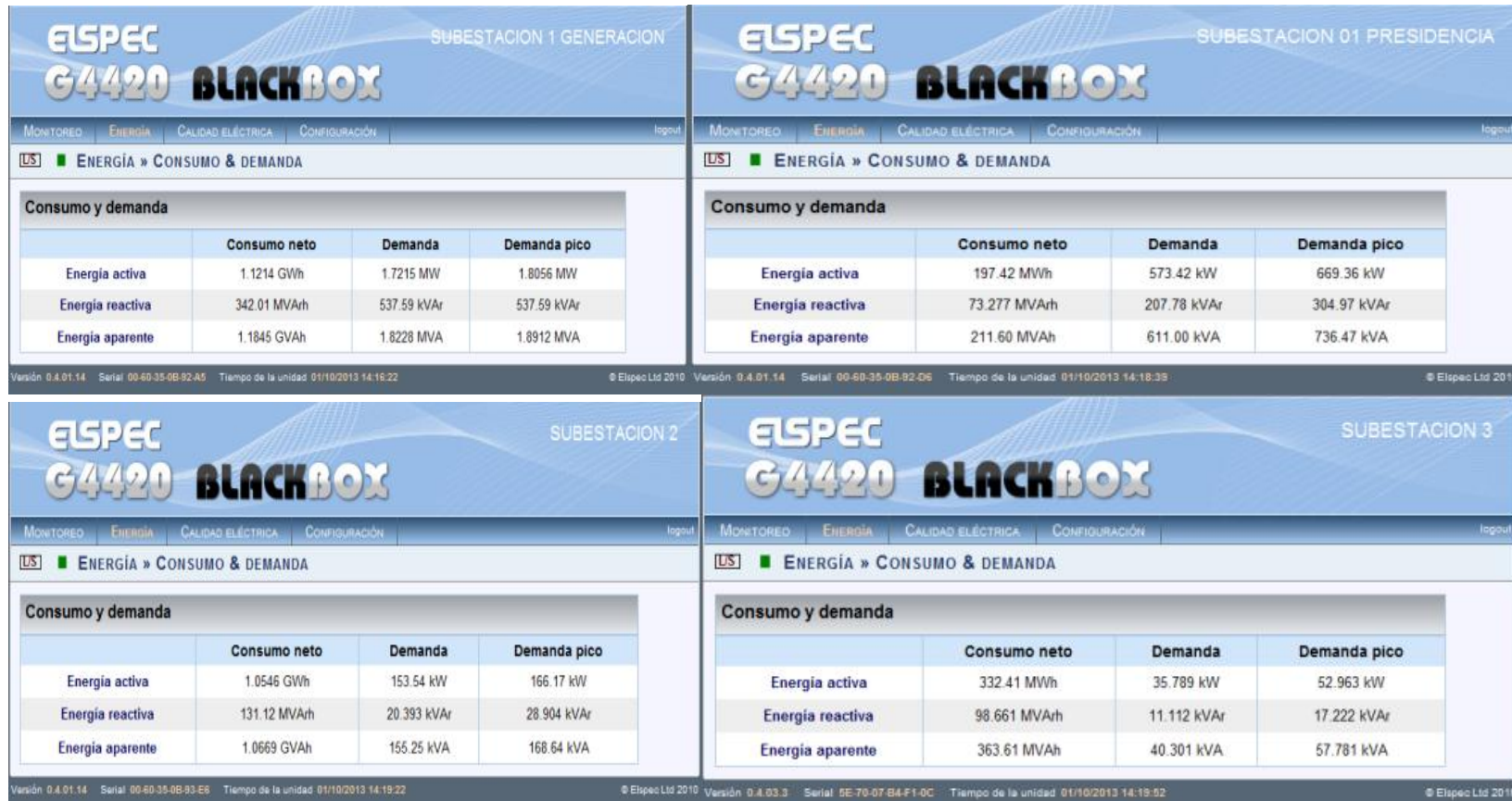


Figura 009: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC en la subestaciones - Industria de Alimentos.



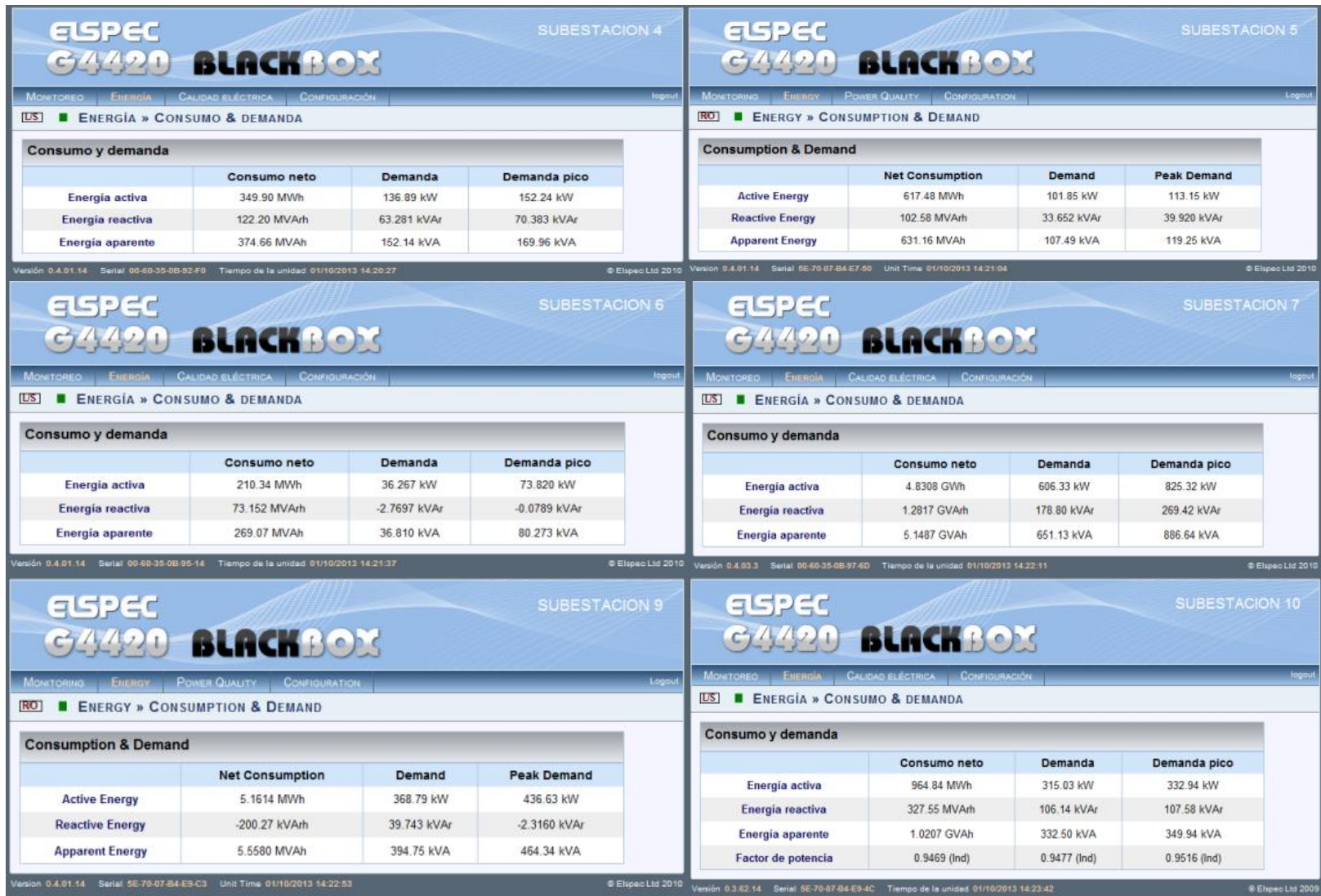
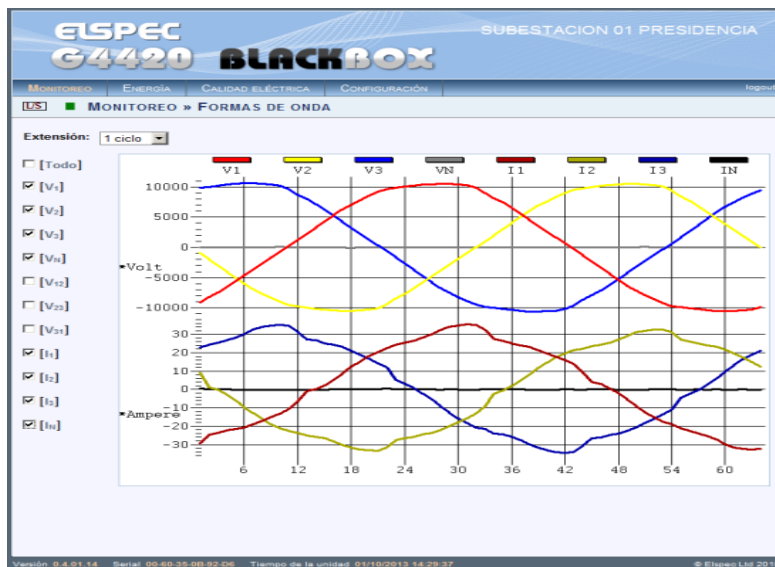


Figura 010: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC en la subestaciones - Industria de Alimentos.



V/I	*TDD	*THD Even	*THD Odd	*Over-deviation	*Under-deviation
V <sub>1</sub>	---	0.0132 %	2.6924 %	7.6210 kV	7.5909 kV
V <sub>2</sub>	---	0.0093 %	2.7557 %	7.6210 kV	7.5743 kV
V <sub>3</sub>	---	0.0146 %	2.6813 %	7.6415 kV	7.6210 kV
V <sub>N</sub>	---	----	----	7.6210 kV	4.3499 V
V <sub>12</sub>	---	0.0108 %	2.4298 %	13.200 kV	13.116 kV
V <sub>23</sub>	---	0.0000 %	2.4061 %	13.200 kV	13.174 kV
V <sub>31</sub>	---	0.0000 %	2.4007 %	13.207 kV	13.200 kV
I <sub>1</sub>	4.6621 %	0.8000 %	7.6861 %	---	---
I <sub>2</sub>	4.2706 %	0.6888 %	7.0049 %	---	---
I <sub>3</sub>	4.1353 %	0.7176 %	6.6833 %	---	---
I <sub>N</sub>	----	----	----	---	---



V/I	Valor eficaz (RMS)	Valor mín	Valor máx	THD	Factor de cresta	Factor K
V <sub>1</sub>	7.5941 kV	7.5013 kV	7.8322 kV	2.7058 %	1.3880	---
V <sub>2</sub>	7.5752 kV	7.5167 kV	7.8460 kV	2.7831 %	1.3856	---
V <sub>3</sub>	7.6433 kV	7.5621 kV	7.8984 kV	2.6930 %	1.3866	---
V <sub>N</sub>	4.2890 V	0.0001 V	5.2571 V	----	----	---
V <sub>12</sub>	13.121 kV	12.992 kV	13.557 kV	2.4481 %	1.4690	---
V <sub>23</sub>	13.176 kV	13.066 kV	13.651 kV	2.4361 %	1.4655	---
V <sub>31</sub>	13.211 kV	13.053 kV	13.627 kV	2.4383 %	1.4671	---
I <sub>1</sub>	21.858 A	9.6279 A	58.510 A	7.6022 %	1.6262	1.3395
I <sub>2</sub>	21.879 A	10.663 A	59.158 A	6.8007 %	1.5281	1.2781
I <sub>3</sub>	22.584 A	10.442 A	59.873 A	6.4666 %	1.5806	1.2822
I <sub>N</sub>	0.0581 A	0.0000 A	0.0900 A	----	----	----

Desbalance	Promedio	Min	Máx
*U- Unbalance	0.3969 %	0.1164 %	0.6890 %
*U+ Positive Sequence	10.747 kV	10.642 kV	11.111 kV
*U- Negative Sequence	42.658 V	12.723 V	74.161 V
*U <sub>0</sub> Sequence	15.728 V	8.5700 V	22.750 V
*U <sub>0</sub> Zero sequence ratio	0.1463 %	0.0788 %	0.2072 %
*I- Unbalance	2.7550 %	0.0139 %	16.132 %
*I+ Positive Sequence	32.033 A	14.376 A	83.636 A
*I- Negative Sequence	0.8825 A	0.0045 A	7.2291 A
*I <sub>0</sub> Zero sequence	0.0406 A	0.0060 A	0.2350 A
*I <sub>0</sub> Zero sequence ratio	0.1269 %	0.0170 %	0.5637 %

Figura 011: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC en la subestaciones - Industria de Alimentos.

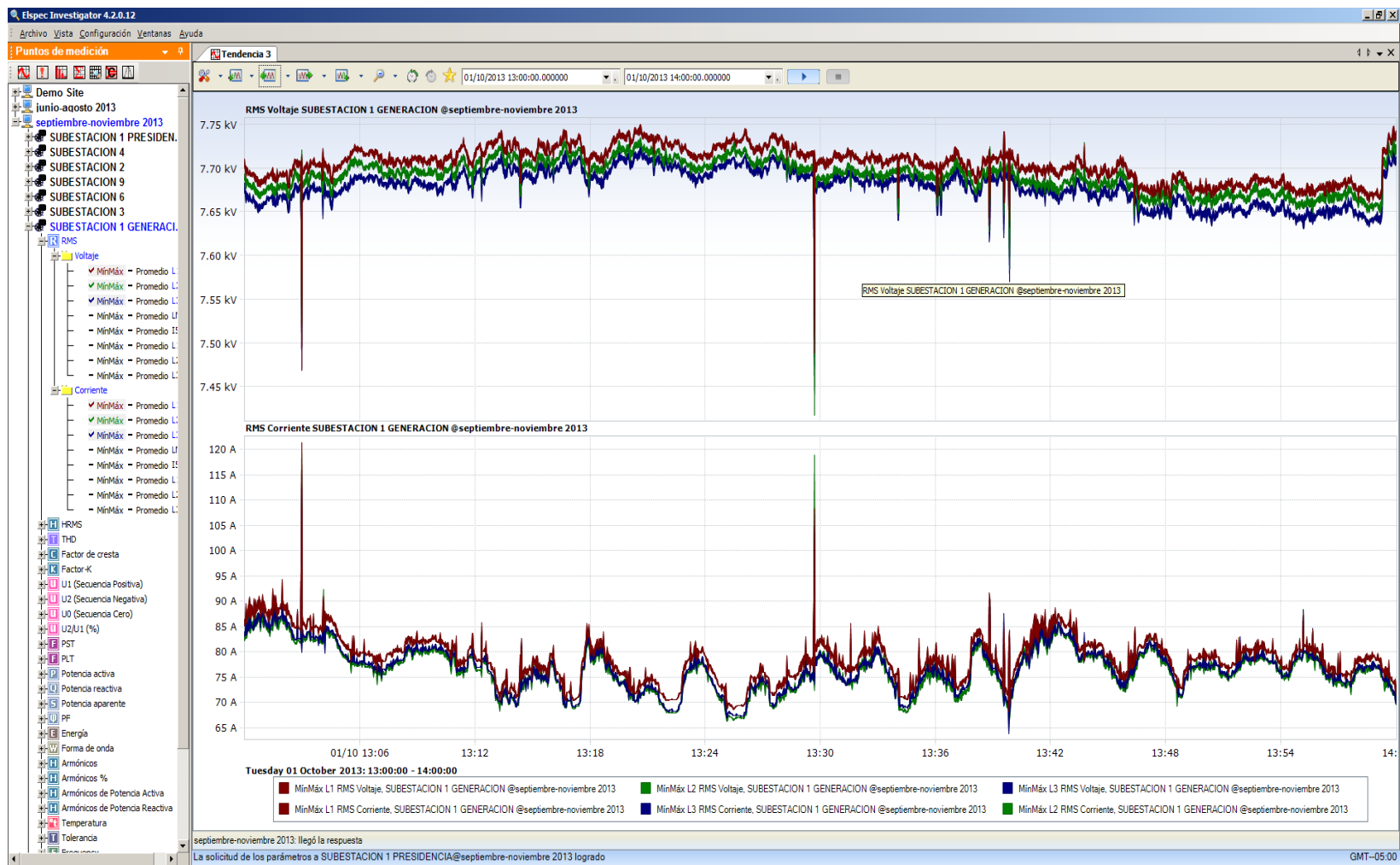


Figura 012: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC INVESTIGATOR en la subestaciones - Industria de Alimentos.



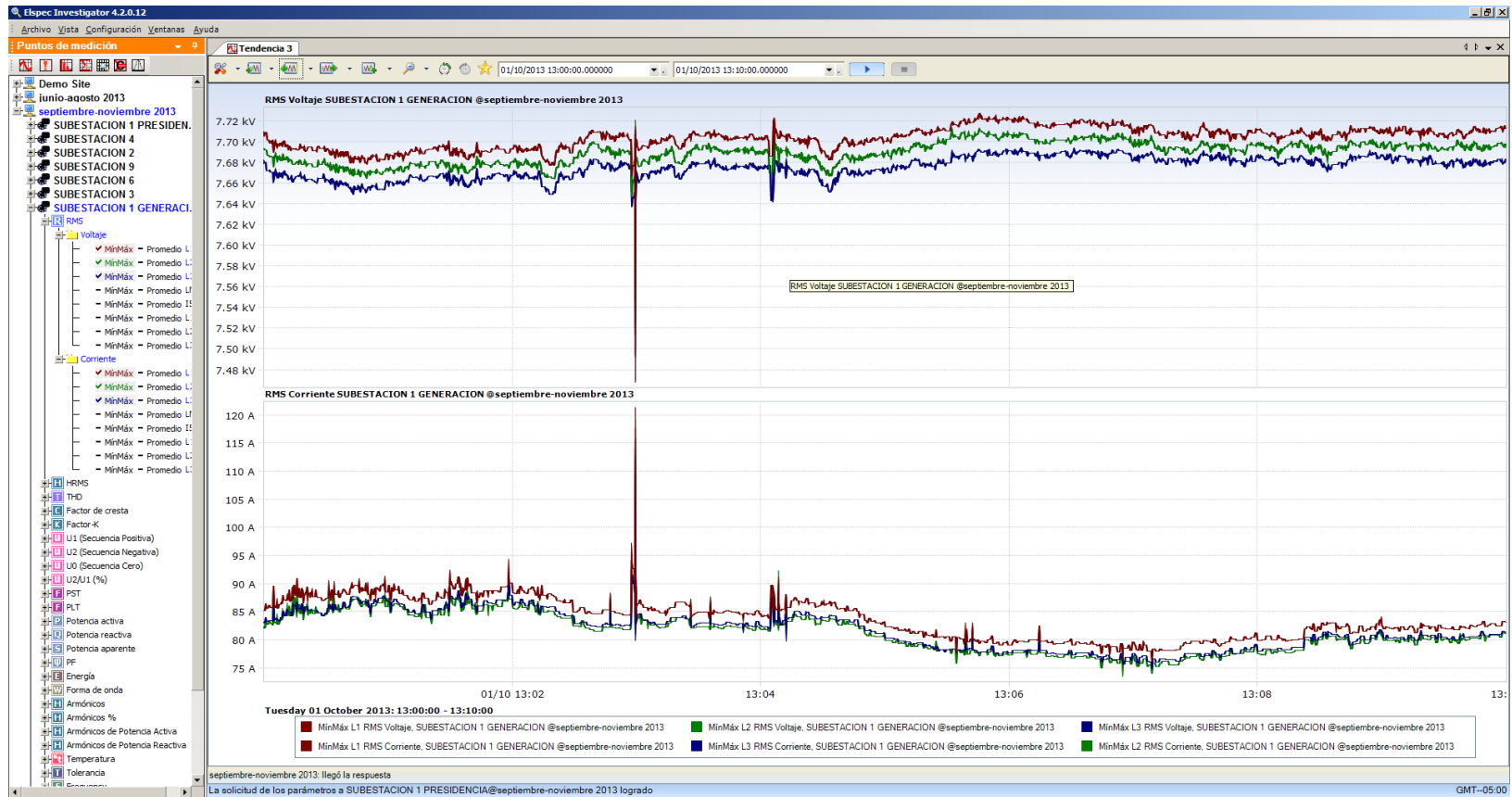


Figura 013: Las mediciones realizada por el sistema ELSPEC INVESTIGATOR en la subestaciones - Industria de Alimentos.

## Anexo J. Transformadores De La Subestación Principal



Figura 014: Los transformadores de la subestación principal - Industria de Alimentos.

Anexo K. Centro De Distribución De Potencia Eléctrica Y El Control Automático



Figura 015: El centro de distribución de potencia eléctrica y el control automático. - Industria de Alimentos.

Anexo L. Los Medidores Del Sistema Elspec



Figura 016: Los dos medidores del sistema ELSPEC de la subestación principal. - Industria de Alimentos.

Anexo M. Consola Remota O Control Automático En La Subestación Principal

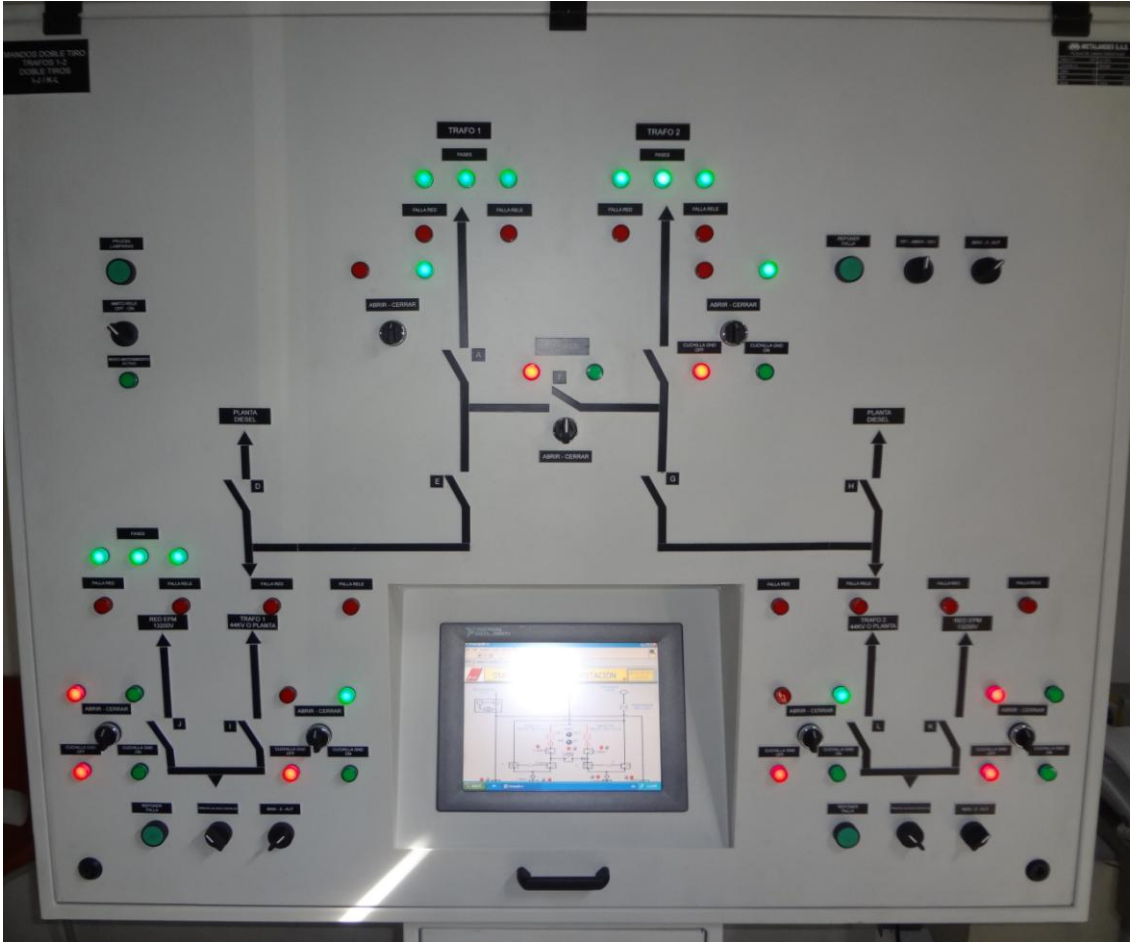


Figura 017: El control automático de la subestación principal. - Industria de Alimentos.



Anexo N. Equipos Para Las Operaciones En Las Celdas “Power Xpert Ux”.



Figura 018: Equipos para el control automático de la subestación principal. - Industria de Alimentos.

## SISTEMA DE UNIDADES

En las instalaciones objeto del presente reglamento se debe aplicar el Sistema Internacional de Unidades (SI), aprobado por la Resolución No. 1823 de 1991 de la Superintendencia de Industria y Comercio. En consecuencia, los siguientes símbolos y nombres tanto de magnitudes como de unidades deben utilizarse en las instalaciones eléctricas.

Tabla 002: Simbología de magnitudes y unidades utilizadas en electrotecnia<sup>7</sup>

NOMBRE DE LA MAGNITUD	SÍMBOLO DE LA MAGNITUD	NOMBRE DE LA UNIDAD	SÍMBOLO DE LA UNIDAD - SI
Admitancia	Y	siemens	S
Capacitancia	C	faradio	F
Carga Eléctrica	Q	culombio	C
Conductancia	G	siemens	S
Conductividad	$\sigma$	siemens por metro	S/m
Corriente eléctrica	I	amperio	A
Densidad de corriente	J	amperio por metro cuadrado	A/m <sup>2</sup>
Densidad de flujo eléctrico	D	culombio por metro	C/m <sup>2</sup>
Densidad de flujo magnético	B	tesla	T
Energía activa	kWh	kilovatio hora	kWh
Factor de potencia	FP	uno	1
Frecuencia	F	hertz	Hz
Frecuencia angular	$\omega$	radián por segundo	rad/s
Fuerza electromotriz	E	voltio	V
Iluminancia	E <sub>v</sub>	lux	lx
Impedancia	Z	ohmio	$\Omega$
Inductancia	L	henrio	H
Intensidad de campo eléctrico.	E	voltio por metro	V/m
Intensidad de campo	H	amperio por metro	A/m
Intensidad luminosa	I <sub>v</sub>	candela	cd
Permeabilidad relativa	$\mu_r$	uno	1
Permitividad relativa	$\epsilon_r$	uno	1
Potencia activa	P	vatio	W
Potencia aparente	P <sub>s</sub>	voltamperio	VA
Potencia reactiva	P <sub>Q</sub>	voltamperio reactivo	VAR
Reactancia	X	ohmio	$\Omega$
Resistencia	R	ohmio	$\Omega$
Resistividad	$\rho$	ohmio metro	$\Omega$ m
Tensión o potencial eléctrico	V	voltio	V

<sup>7</sup> Datos tomados del RETIE.