



Área de conocimientos de Ingeniería y Afines.

## Elaboración de manual para la transición tecnológica de las subestaciones AIS a GIS

**Trabajo monográfico para optar al título de  
Ingeniero Eléctrico**

Elaborado por:

Br. Pedro José  
Mendoza González

Carnet: 2012-42076

Br. Aljady Yasser  
Fuentes Zalan

Carnet: 2014-1081U

Tutor:

Msc. Pedro Joaquín  
Pérez Orozco

22 de noviembre del 2024

Managua, Nicaragua



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
RECINTO UNIVERSITARIO "PEDRO ARAUZ PALACIOS"  
AREA DE CONOCIMIENTO DE INGENIERIA Y AFINES

Managua, 07 de noviembre del 2024

MSc. Luis Alberto Chavarría Valverde  
Director Área de Conocimiento de Ingeniería y Afines  
Universidad Nacional de Ingeniería.

Estimado MSc. Chavarría a través de la presente hago constar que el Br. **Pedro José Mendoza González** con número de carnet 2012-42076 y el Br. **Aljady Yasser Fuentes Zalan** con el número de carnet 2014-1081U, estudiantes del programa de Ingeniería Eléctrica, han finalizado el proceso de pre -- defensa de su tesis monográfica que tiene como tema **"Elaboración de manual de la transición tecnológica de las subestaciones AIS a GIS"**.

La tesis monográfica que se presenta ha sido revisada y corregida tomando en cuenta las observaciones de los miembros del jurado asignados por el jefe del Programa Académico de Ingeniería eléctrica.

Por consiguiente, valoro que la misma cumple con los requisitos establecidos en la Normativa de culminación de Estudios establecido por la Universidad Nacional de Ingeniería y que está lista para ser entregada y sometida al proceso de Defensa Instaurado por la Institución.

Dado en la ciudad de Managua, a los 7 días del mes de noviembre del 2024

Atentamente.

---

MSc. Pedro Joaquín Pérez Orozco  
TUTOR

Cc: Archivo



Área de Conocimiento de  
Ingeniería y Afines

**SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA**

**F-8: CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**

El Suscrito Secretario del **ÁREA DEL CONOCIMIENTO DE INGENIERÍA Y AFINES** hace constar que:

**MENDOZA GONZALEZ PEDRO JOSE**

Carné: **2012-42076** Turno: **Diurno** Plan de Asignatura: **2015** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de **INGENIERÍA ELECTRICA**, en el año 2021 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente **CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los diecinueve días del mes de agosto del año dos mil veinte y cuatro.

Atentamente,



Msc. Augusto César Palacios Rodríguez  
**SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA**



Teléfono: (505) 2251 8276



Recinto Universitario Pedro Aráuz Palacios  
Costado Sur de Villa Progreso.  
Managua, Nicaragua.



luis.chavarria@fti.uni.edu.ni  
www.uni.edu.ni



Área de Conocimiento de  
Ingeniería y Afines

SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

**F-8: CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**

El Suscrito Secretario del **ÁREA DEL CONOCIMIENTO DE INGENIERÍA Y AFINES** hace constar que:

**FUENTES ZALAN ALJADY YASSER**

Carné: **2014-1081U** Turno: **Diurno** Plan de Asignatura: **2015** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de **INGENIERÍA ELECTRICA**, en el año 2022 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente **CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los veinte días del mes de agosto del año dos mil veinte y cuatro.

Atentamente,



Msc. Augusto César Palacios Rodríguez  
SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA



Teléfono: (505) 2251 8276



Recinto Universitario Pedro Aráuz Palacios  
Costado Sur de Villa Progreso.  
Managua, Nicaragua.



luis.chavarria@ftl.uni.edu.ni  
www.uni.edu.ni

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 20-ago.-2024



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
ÁREA DEL CONOCIMIENTO DE INGENIERÍA Y AFINES  
SECRETARIA ACADEMICA

HOJA DE MATRICULA  
AÑO ACADEMICO 2024

No. Recibo **41876**

No. Inscripción **251**

NOMBRES Y APELLIDOS: Aljady Yasser Fuentes Zalan

CARRERA: INGENIERÍA ELECTRICA

CARNET: 2014-1081u

TURNO:

PLAN DE ESTUDIO: 2015

SEMESTRE: SEGUNDO SEMESTRE 2024

FECHA: 24/07/2024

| No. | ASIGNATURA   | GRUPO | AULA | CRED. | F | R |
|-----|--------------|-------|------|-------|---|---|
| 1   | ULTIMA LINEA |       |      |       |   |   |

F:Frecuencia de Inscripciones de Asignatura R: Retiro de Asignatura.

DORTUNO

GRABADOR

FIRMA Y SELLO DEL  
FUNCIONARIO

FIRMA DEL  
ESTUDIANTE

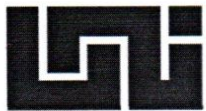
cc:ORIGINAL:ESTUDIANTE - COPIA:EXPEDIENTE.

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 24-jul.-2024



| No. Recibo <b>41905</b>                          |              | No. Inscripción <b>262</b>      |      |                   |   |   |
|--------------------------------------------------|--------------|---------------------------------|------|-------------------|---|---|
| NOMBRES Y APELLIDOS: Pedro Jose Mendoza Gonzalez |              |                                 |      |                   |   |   |
| CARRERA: INGENIERÍA ELECTRICA                    |              | CARNET: 2012-42076              |      | TURNO:            |   |   |
| PLAN DE ESTUDIO: 2015                            |              | SEMESTRE: SEGUNDO SEMESTRE 2024 |      | FECHA: 24/07/2024 |   |   |
| No.                                              | ASIGNATURA   | GRUPO                           | AULA | CRED.             | F | R |
| 1                                                | ULTIMA LINEA |                                 |      |                   |   |   |

FIRMA DEL  
ESTUDIANTE



## Decanatura | FEC

Universidad Nacional de Ingeniería  
Recinto Universitario "Simón Bolívar"  
Facultad de Electrotecnia y Computación

**Decanatura**  
DF-10-2022-16

Managua, 13 de octubre del 2022.

### Bachilleres.

Pedro Jose Mendoza Gonzalez 2012-42076.

Aljady Yasser Fuentes Zalan 2014-1081U.

**Egresado de la Carrera de Ingeniería en Eléctrica.**

Estimados Bachilleres:

El suscrito Decano de la Facultad de Electrotecnia y Computación, a través de la presente autoriza de manera formal la inscripción de la Monografía Titulada **"Elaboración de Manual para la Transición Tecnológica de las Subestaciones AIS a GIS"**. Para optar al Título de Ingeniero en Eléctrica, para tal efecto se nombra como Tutor de la Monografía al **Msc. Pedro Pérez**.

Así mismo le solicito proceda a la **Inscripción de dicho Tema Monográfico en Secretaria Académica** de la facultad, con la finalidad de darle control y seguimiento, de acuerdo a los reglamentos establecidos.

Se les recuerda que, según la normativa para los trabajos monográficos, a partir de la fecha de inscripción tiene 12 meses para defender dicho trabajo.

Sin más a que referirme y deseándoles mucho éxito en la culminación de esta etapa, me despido.

Atentamente,



**Ing. Augusto César Palacios Rodríguez**  
**Decano FEC**

C/c: Ing. María Lourdes Montes.  
Ing. Napoleón Blanco.  
Msc. Pedro Pérez Orozco.  
Archivo.

Secretaria Académica.  
Jefe de Dpto.-Eléctrica.  
Tutor.



Teléfono: (505) 2270 5126



Recinto Universitario Simón Bolívar  
Avenida Universitaria.  
Managua, Nicaragua.  
Apdo: 5595



augusto.palacios@fec.uni.edu.ni  
www.fec.uni.edu.ni

## **Dedicatoria**

En primer lugar, dedicamos esta tesis monográfica a Dios por la fuerza y sabiduría que nos brindó para poder culminar este trabajo.

Posteriormente dedicamos esta tesis monográfica a nuestros padres quienes nos han apoyado a lo largo de todo este tiempo de manera constante, incondicional y desinteresada para poder terminar este trabajo.

Finalmente dedicamos este trabajo a todas las personas involucradas que nos apoyaron de distintas maneras directa e indirectamente quienes nos ayudaron a culminar este trabajo de tesis monográfica.

Con mucho aprecio:

Pedro José Mendoza González y Aljady Yasser Fuentes Zalan.

## **Agradecimiento**

Agradezco primeramente a Dios por haberme permitido recuperar mi salud y darme sabiduría para lograr terminar de manera satisfactoria mi carrera, a mis padres y familiares por haberme brindado el apoyo incondicional durante todo mi trayecto de formación personal. También a mi tutor y mi compañero de tesis por la paciencia que me han tenido.

Pedro José Mendoza González

En primer lugar, doy gracias a Dios por haberme mostrado el camino y haberme dado la voluntad y energía para culminar mis estudios. En segundo lugar, agradezco a mis padres quienes siempre me han apoyado económica y espiritualmente para continuar mis estudios. También agradezco a mis amigos. quienes me han apoyado animándome en la culminación de mis estudios superiores, a mi compañero de tesis que a pesar de su condición física ha salido adelante y a nuestro tutor que han estado constantemente trabajando, motivando y presionando para lograr este paso final.

Aljady Yasser Fuentes Zalan.

## Contenido

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción.....                                                                              | 1  |
| Antecedentes.....                                                                              | 4  |
| Justificación .....                                                                            | 7  |
| Objetivos.....                                                                                 | 9  |
| Objetivos Generales .....                                                                      | 9  |
| Objetivos Específicos .....                                                                    | 9  |
| Diseño metodológico .....                                                                      | 10 |
| Proceso de Transferencia tecnológica .....                                                     | 12 |
| Descripción técnica.....                                                                       | 29 |
| Consideraciones especiales. ....                                                               | 39 |
| Metodología de cálculo de corrientes de corto circuito. ....                                   | 42 |
| Metodología de cálculo de puesta a tierra. ....                                                | 45 |
| Simulación .....                                                                               | 50 |
| Experiencia de servicio con subestaciones aisladas en gas. ....                                | 54 |
| Prueba de tensión in situ, 420 kV GIS .....                                                    | 55 |
| Puesta en marcha del primer GIS comercial de 800 kV cinco años de experiencia en servicio..... | 57 |
| Experiencia operativa .....                                                                    | 58 |
| Experiencia operativa con GIS para 145 y 245 kV .....                                          | 60 |
| Disposición de las subestaciones .....                                                         | 61 |
| Mantenimiento.....                                                                             | 61 |
| Experiencia operacional.....                                                                   | 62 |
| Experiencia de servicio y procedimientos de mantenimiento .....                                | 64 |
| Estructura de red .....                                                                        | 65 |
| Características de diseño en los componentes GIS .....                                         | 66 |
| Instalación.....                                                                               | 66 |
| Puesta en marcha .....                                                                         | 67 |
| Mantenimiento .....                                                                            | 68 |
| Método de diagnóstico .....                                                                    | 69 |
| Medida de pureza de SF <sub>6</sub> (porcentajes de gas extraño) .....                         | 69 |
| Humedad en el Gas aislante.....                                                                | 69 |
| Acidez del gas aislante .....                                                                  | 70 |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Prueba de fugas de la Encapsulación .....                                                | 70  |
| Medición de descargas parciales. ....                                                    | 71  |
| Otras tareas de mantenimiento .....                                                      | 71  |
| Fallas .....                                                                             | 72  |
| Piezas de repuesto .....                                                                 | 74  |
| Personal. ....                                                                           | 74  |
| Restricciones en la reparación de fallas de GIS .....                                    | 76  |
| Fallas causadas internamente – Humedad .....                                             | 77  |
| Fallos causados internamente – Partículas .....                                          | 77  |
| Fallos causados internamente - pérdida de contacto eléctrico.....                        | 78  |
| Defectos causados internamente - tensiones eléctricas elevadas .....                     | 79  |
| Fallos causados externamente - daños catastróficos .....                                 | 81  |
| Fallos causados externamente - funcionamiento inadecuado .....                           | 81  |
| Fallas causadas externamente: instalación o mantenimiento inapropiados en el campo ..... | 82  |
| Resumen de la experiencia de falla.....                                                  | 83  |
| Conocimiento de la falla – ubicación .....                                               | 83  |
| Diagnóstico de fallas .....                                                              | 84  |
| Disponibilidad de repuestos.....                                                         | 86  |
| Técnicas de reparación. ....                                                             | 86  |
| Pruebas de reparación. ....                                                              | 87  |
| Registro de servicio de GIS reparado .....                                               | 87  |
| Experiencia y procedimientos de reparación de GIS. ....                                  | 88  |
| Estudios de casos .....                                                                  | 91  |
| Consideraciones económicas .....                                                         | 94  |
| Minimizar el tiempo de inactividad.....                                                  | 94  |
| Montaje electromecánico.....                                                             | 98  |
| Limpieza de barraje y bridas .....                                                       | 99  |
| Lubricantes y Selladores .....                                                           | 100 |
| Ensamble de barra colectora o barraje.....                                               | 100 |
| Manejo de SF <sub>6</sub> .....                                                          | 101 |
| Transición tecnológica AIS a GIS en Nicaragua.....                                       | 106 |
| Conclusión.....                                                                          | 116 |
| Recomendaciones.....                                                                     | 118 |

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Web grafía .....                                                              | 119 |
| Bibliografía.....                                                             | 120 |
| Anexos .....                                                                  | 121 |
| Aplicación de metodologías de cálculos .....                                  | 127 |
| Simbología .....                                                              | 127 |
| Aplicación de Selección de Conductor .....                                    | 128 |
| Metodología de selección de banco de baterías.....                            | 148 |
| Selección de banco de batería para el proyecto GIS hipotético.....            | 150 |
| Características complementarias y recomendaciones para especificaciones. .... | 156 |
| Cálculos de la red de tierra .....                                            | 157 |
| Planos .....                                                                  | 168 |

## Tabla de ilustraciones

|                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 1.Reducción del tamaño de GIS – tensión nominal 145 kV .....                                                                           | 5   |
| Ilustración 2.Elementos del proceso de transición tecnológica .....                                                                                | 15  |
| Ilustración 3.Modelo de Triple hélice.....                                                                                                         | 18  |
| Ilustración 4.Modelo descriptivo de agentes de la triple hélice.....                                                                               | 21  |
| Ilustración 5.Metodología de cálculo de corriente de cortocircuito y selección de conductores .....                                                | 42  |
| Ilustración 6.Metodología de cálculo de puesta de tierra.....                                                                                      | 45  |
| Ilustración 7. Escenario con proyecto año .....                                                                                                    | 50  |
| Ilustración 8. Escenario sin proyecto .....                                                                                                        | 50  |
| Ilustración 9. Escenario ante la contingencia de la línea de transmisión Las colinas – Altamira GIS 138 kV .....                                   | 51  |
| Ilustración 10. Escenario ante la contingencia de la línea de transmisión Las Colinas – Altamira AIS 138 kV .....                                  | 51  |
| Ilustración 11. escenario ante la contingencia de la línea de transmisión Oriental – Altamira GIS 138 kV                                           | 52  |
| Ilustración 12. escenario ante la contingencia de la línea de transmisión Oriental – Altamira AIS 138 kV                                           | 52  |
| Ilustración 13.Nodo Slack.....                                                                                                                     | 53  |
| Ilustración 14.Numero de subestaciones GIS en noruega (Mayo,1985). .....                                                                           | 54  |
| Ilustración 15.Frecuencia de fracasos de subestaciones GIS (Mayo,1985). .....                                                                      | 55  |
| Ilustración 16.Tabla de prueba de voltaje.....                                                                                                     | 56  |
| Ilustración 17.operaciones de interruptores automáticos GIS de 800 kV, Diciembre 11,1979. ....                                                     | 58  |
| Ilustración 18. Corte transversal del conjunto aislador de fuelle fallido de 765 kV .....                                                          | 58  |
| Ilustración 19. Tasa real de fuga de gas SF <sub>6</sub> .....                                                                                     | 59  |
| Ilustración 20. corte del conjunto de aislador fallido de 765 kV. ....                                                                             | 60  |
| Ilustración 21.Datos de la subestación GIS. ....                                                                                                   | 61  |
| Ilustración 22. Tasa de falla dependiendo del tiempo de servicio .....                                                                             | 63  |
| Ilustración 23. Tasa de fracaso por año. ....                                                                                                      | 63  |
| Ilustración 24. Datos de redes de aparellaje de SF <sub>6</sub> en Berlín y Jeddah. ....                                                           | 65  |
| Ilustración 25.Analizador de gas hexafluoruro de azufre.....                                                                                       | 70  |
| Ilustración 26,Prueba de fuga de hexafluoruro de azufre.....                                                                                       | 71  |
| Ilustración 27.datos de aparellaje en Berlin y Jeddah .....                                                                                        | 73  |
| Ilustración 28. Experiencia de fallas con GIS .....                                                                                                | 85  |
| Ilustración 29. Tiempo de relación de procedimientos habituales de mantenimiento preventivo.....                                                   | 90  |
| Ilustración 30.Mirillas de compartimiento de subestación GIS.....                                                                                  | 93  |
| Ilustración 31. GIS con desconexiones de línea AIS. ....                                                                                           | 97  |
| Ilustración 32. Híbrido GIS-AIS .....                                                                                                              | 97  |
| Ilustración 33. GIS con secciones "ultra confiables". ....                                                                                         | 98  |
| Ilustración 34.Cabeza del perno marcado en señal de torque comprobado. ....                                                                        | 101 |
| Ilustración 35.Carretilla con bombona de gas para vaciado y llenado de SF <sub>6</sub> y Manguera manifold típica para realización de vaciado..... | 102 |
| Ilustración 36.Proceso de tratamiento y recuperación de SF <sub>6</sub> .....                                                                      | 102 |
| Ilustración 37.Establecimiento de una Nueva subestación GIS.....                                                                                   | 115 |
| Ilustración 38.Datos generales de Subestación Altamira .....                                                                                       | 121 |

|                                                                                                                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Ilustración 39. Foto satelital de Subestación Altamira que delimita la superficie ocupada de sus instalaciones. ....                                                                           | 121        |
| Ilustración 40. Foto satelital de Subestación Altamira que representa la superficie ocupada por su alternativa GIS. ....                                                                       | 122        |
| Ilustración 41. Foto de Subestación Altamira. ....                                                                                                                                             | 122        |
| Ilustración 42. Foto de subestación GIS Ticuantepe III 138 kV como referencia de subestación GIS.....                                                                                          | 123        |
| Ilustración 43. Foto de subestación GIS Ticuantepe III 138 kV como referencia de subestación GIS.....                                                                                          | 123        |
| Ilustración 44. Foto de subestación GIS Ticuantepe III 138 kV como referencia de subestación GIS.....                                                                                          | 124        |
| Ilustración 45. Foto de subestación GIS Ticuantepe III 138 kV como referencia de subestación GIS.....                                                                                          | 124        |
| Ilustración 46. Prueba de aumento de vacío .....                                                                                                                                               | 125        |
| Ilustración 47. Comparativa en la superficie utilizada por subestaciones AIS y su alternativa GIS .....                                                                                        | 125        |
| Ilustración 48. Etiquetas de procesamiento de zonas de gas.....                                                                                                                                | 126        |
| Ilustración 49. Tabla de selección de potencia de transformador de acuerdo a nivel de tensión. ....                                                                                            | 130        |
| Ilustración 50. Diagrama unifilar simplificado.....                                                                                                                                            | 131        |
| Ilustración 51. Resultados de simulación para corriente de cortocircuito. ....                                                                                                                 | 131        |
| Ilustración 52. Directrices de impedancia de cortocircuito. Nota: tomado de Transformador de Potencia en Alta Tensión Especificación Técnica y Diseño – Desempeño General y Valor Global ..... | 132        |
| Ilustración 53. Ejemplo de transformador de servicio auxiliar.....                                                                                                                             | 134        |
| Ilustración 54. Factor de corrección para cables tripolares. ....                                                                                                                              | 137        |
| Ilustración 55. Intensidades máximas admisibles para cables tripolares.....                                                                                                                    | 138        |
| Ilustración 56. Batería de plomo Acido con un diseño de placa tubular .....                                                                                                                    | 140        |
| Ilustración 57. batería de plomo acido de tipo empastado. ....                                                                                                                                 | 140        |
| <i>Ilustración 58. Banco de baterías de níquel cadmio. ....</i>                                                                                                                                | <i>141</i> |
| Ilustración 59. Factores de corrección del tamaño de celda para la temperatura para celdas ventiladas y VRLA.....                                                                              | 144        |
| Ilustración 60. Metodología de selección de banco de baterías .....                                                                                                                            | 148        |
| Ilustración 61. Diagrama de ciclo de trabajo. ....                                                                                                                                             | 151        |
| Ilustración 62. Tabulación del diagrama de ciclo de trabajo.....                                                                                                                               | 151        |
| Ilustración 63. hoja de trabajo de selección de tamaño de celda .....                                                                                                                          | 153        |
| Ilustración 64. Curva de evaluación compuesta hipotética para la celda XYZ.....                                                                                                                | 154        |
| Ilustración 65. hoja de trabajo de selección de tamaño de celda .....                                                                                                                          | 155        |

## Índice de ecuaciones

|                   |     |
|-------------------|-----|
| Ecuación 1 .....  | 33  |
| Ecuación 2 .....  | 33  |
| Ecuación 3 .....  | 34  |
| Ecuación 4 .....  | 34  |
| Ecuación 5 .....  | 129 |
| Ecuación 6 .....  | 129 |
| Ecuación 7 .....  | 129 |
| Ecuación 8 .....  | 130 |
| Ecuación 9 .....  | 131 |
| Ecuación 10 ..... | 132 |
| Ecuación 11 ..... | 133 |
| Ecuación 12 ..... | 133 |
| Ecuación 13 ..... | 133 |
| Ecuación 14 ..... | 133 |
| Ecuación 15 ..... | 133 |
| Ecuación 17 ..... | 134 |
| Ecuación 16 ..... | 134 |
| Ecuación 18 ..... | 134 |
| Ecuación 20 ..... | 135 |
| Ecuación 19 ..... | 135 |
| Ecuación 21 ..... | 135 |
| Ecuación 22 ..... | 135 |
| Ecuación 23 ..... | 137 |
| Ecuación 24 ..... | 137 |
| Ecuación 25 ..... | 138 |
| Ecuación 26 ..... | 138 |
| Ecuación 27 ..... | 152 |
| Ecuación 28 ..... | 152 |
| Ecuación 32 ..... | 160 |
| Ecuación 31 ..... | 160 |
| Ecuación 30 ..... | 160 |
| Ecuación 29 ..... | 160 |
| Ecuación 33 ..... | 160 |
| Ecuación 34 ..... | 160 |
| Ecuación 35 ..... | 160 |
| Ecuación 37 ..... | 161 |
| Ecuación 36 ..... | 161 |
| Ecuación 39 ..... | 162 |
| Ecuación 38 ..... | 162 |
| Ecuación 42 ..... | 163 |
| Ecuación 41 ..... | 163 |
| Ecuación 40 ..... | 163 |

|                  |     |
|------------------|-----|
| Ecuación 43..... | 163 |
| Ecuación 44..... | 163 |
| Ecuación 45..... | 163 |
| Ecuación 48..... | 164 |
| Ecuación 47..... | 164 |
| Ecuación 46..... | 164 |
| Ecuación 50..... | 164 |
| Ecuación 49..... | 164 |
| Ecuación 51..... | 164 |
| Ecuación 52..... | 164 |
| Ecuación 53..... | 165 |
| Ecuación 57..... | 165 |
| Ecuación 56..... | 165 |
| Ecuación 55..... | 165 |
| Ecuación 54..... | 165 |
| Ecuación 58..... | 165 |
| Ecuación 60..... | 166 |
| Ecuación 59..... | 166 |
| Ecuación 61..... | 166 |
| Ecuación 64..... | 166 |
| Ecuación 63..... | 166 |
| Ecuación 62..... | 166 |
| Ecuación 66..... | 167 |
| Ecuación 65..... | 167 |

## Índice de tablas

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1. Beneficios de tecnología GIS con respecto a las subestaciones convencional.....         | 17  |
| Tabla 2.Recomendaciones generales de mantenimiento .....                                         | 89  |
| Tabla 3.Aproximaciones de medidas y pares de torsion de E.E.U.U y el Sistema internacional. .... | 101 |
| Tabla 4.Obra civil de subestación GIS Corinto.....                                               | 109 |
| Tabla 5.Gasto de realización de proyecto GIS Corinto .....                                       | 111 |
| Tabla 6.Simbología común en MIE-RAT 13 .....                                                     | 127 |
| Tabla 7.Simbología en IEEE 80 std 485 (a) .....                                                  | 127 |
| Tabla 8.Simbología IEEE 80 std 485 (b) .....                                                     | 128 |
| Tabla 9.Datos relevantes de línea y de red para cálculo de tierra .....                          | 157 |
| Tabla 10.Datos de partidas del terreno .....                                                     | 158 |
| Tabla 11.Datos de las dimensiones a considerar del terreno que abarcara la subestación. ....     | 158 |
| Tabla 12.Resultados de cálculos de red a tierra MIE-RAT 13 .....                                 | 161 |
| Tabla 13.Tabulación comparativa entre tensiones admisibles y aplicadas. ....                     | 162 |

## Resumen

Esta tesis pretende la elaboración de un manual de transición tecnológica de las subestaciones AIS a GIS que permita la facilidad de instauración de la tecnología GIS en subestaciones AIS en Nicaragua.

En lo cual un plan bien elaborado de transición tecnología tiene una serie de ventajas ya que la transición de una tecnología existente AIS (Air insulated Substation) a la tecnología GIS (Gas Insulated Substation) requiere que se enfrente desafíos como la resistencia al cambio y falta de experiencia o carencia de familiaridad con el estado del arte. La transferencia tecnológica en la industria de servicios eléctricos suele ser obstaculizada por estos factores. Problemas aparentemente menores tienden a tener mayor influencia en la capacidad de la nueva tecnología. también se tiene que tener en consideración la evaluación de la implementación de la nueva tecnología dentro del ámbito laboral nicaragüense, en el cual quedará ponderado en términos de costo, mano de obra y tiempo estimado en el cual se iniciaría tal periodo de evaluación en el momento que se empieza a captar beneficios. Dentro de esta valoración se debe tener en cuenta los riesgos y beneficios de la introducción de una nueva tecnología, la cual requerirá de un análisis exhaustivo. Este tipo de análisis se complica aún más por la diferencia en los niveles de experiencia y confianza en la precisión de los datos que se comparan.

Si bien hay que tener en especial consideración de la evolución y mejora de este primer manual en un futuro de acuerdo a como las instituciones encargadas de la transmisión y distribución de energía eléctrica de Nicaragua se vayan desempeñando de acuerdo a las premisas con las que se concluirá este manual.

## Introducción

El presente documento está compuesto por: una introducción que nos induce a la problemática existente relacionada al sistema de transmisión de Nicaragua en la cual se ha percibido fallas intempestivas en líneas y subestaciones que derivan en un aumento de tiempo y costos de mantenimiento en subestaciones y líneas de transmisión que contribuye al costo y pérdida de competitividad en actividades comerciales, industriales y turísticas de la zona de influencia, esto debido a una infraestructura obsoleta o descuidada, posteriormente, los antecedentes brindan una breve reseña relacionados a este tema en Nicaragua, luego, una justificación del porque es necesario realizar el análisis correspondiente de este trabajo monográfico, lo cual no hay trabajos de igual magnitud de investigación, consecutivamente, el marco teórico que proporciona el fundamento teórico y las bases para cumplir con los objetivos propuestos. Sucesivamente, el diseño metodológico que plantea el tipo y diseño que la investigación desarrollará para llegar a los resultados esperados, seguidamente, un cronograma que estipula el tiempo que llevará desarrollar la investigación y finalmente las referencias bibliográficas extraído de diversas fuentes.

La transición de una tecnología existente AIS (Air insulated Substation) a la tecnología GIS (Gas Insulated Substation) requiere concentrarse en un proceso de transición moldeado por un modelo procedimental que limite las instituciones protagonistas y que algún otro no termine obstaculizando la modernización de las subestaciones AIS en Nicaragua.

El costo y fiabilidad de una nueva tecnología no es única y es evaluado conservadoramente cuando se compara con más diseños similares. El equipo GIS es más sensible que el AIS desde el punto de vista de diseño debido al elevado estrés eléctrico en espacios relativamente pequeños.

Gestionar una transición de la tecnología AIS a GIS requiere reconocer el hecho de que esta es una tecnología más sensible que AIS con respecto al diseño. La tecnología es lo suficientemente diferente de las AIS que los tipos de arreglo de barra colectora y disposición física de una instalación GIS, requiere consideraciones cuidadosas como fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad que dependen en gran manera de estos y otros factores. El establecimiento de criterios de fiabilidad que describa la filosofía de diseño, operación y mantenimiento de la planificación de sistemas de potencia ayudará a enfocarse en el sistema GIS adecuado. Los criterios de fiabilidad se basan normalmente en la experiencia de los sistemas de potencia AIS, este criterio es importante para un desempeño óptimo del sistema.

La transición exitosa de AIS a GIS dependerá en gran medida de la estrategia planificada a través de la división de construcción, diseño, operación, y mantenimiento de la subestación. Si el trabajo de las divisiones concernientes procede en paralelo el progreso de la construcción de la subestación GIS será más rápido y continuo.

Este proyecto pretende esclarecer la implementación de una nueva tecnología de construcción de subestaciones aisladas en gas más específicamente hexafluoruro de azufre a un proyecto hipotético con valores de transmisión típicos de Nicaragua.

Este estudio logrará clarificar los impactos positivos que tendrá la implementación de esta nueva tecnología en las locaciones adecuadas en el territorio nicaragüense como lo son:

1. El uso de un gas aislante 10 veces mejor que permite diseñar una subestación mucho más compacta. Esto también significa una reducción significativa en el **área** conectada a **tierra** de la subestación.

2. Este diseño ‘compacto’ significa que los conductores de fase están mucho más cerca que en AIS y con cajas metálicas, para la contención de gas, las corrientes inducidas electromagnéticamente aparecen en el sistema de puesta a tierra, por ende, ocupa muy poco espacio (1/10) en comparación con las subestaciones ordinarias.
3. Las subestaciones con aislamiento de gas tienen una envoltura externa conectada a tierra que encierra el conductor interno de alta tensión, a diferencia de los equipos convencionales cuya base más cercana es la superficie de la tierra. Al mismo tiempo, la separación de fases es menor.
4. Libre de un mantenimiento exhaustivo.

La finalidad de aplicar esta tecnología en la subestación Altamira, como se logra ver en la ilustración 3 en anexos se encuentra localizada a las proximidades del hospital Manolo Morales, se debe a la importancia que esta tiene en el denominado anillo de Managua, detallado en la ilustración 2 en anexos, y la posibilidad de utilizar el espacio ahorrado en una posible ampliación y modernización del hospital Manolo Morales o permitir una futura ampliación de la capacidad de una subestación GIS previamente construida, así como dar mayor seguridad a la red eléctrica al anillo de Managua.

## Antecedentes

Como todo proyecto su desarrollo y evolución conlleva el implicamiento de un gran número de disciplinas y por ende un vasto número de personas expectantes del control de su evolución a lo largo del tiempo de ejecución, debido a que no se ha llevado a cabo en Nicaragua proyectos de subestaciones que implementen tecnología GIS, es necesario conocer el trasfondo de esta tecnología y en que otras partes de América se ha logrado implementar con éxito para tener un mejor entendimiento de esta y que recursos tecnológicos se tienen en Nicaragua que faciliten su utilización.

Los primeros conjuntos de aparellaje aislados en gas se diseñaron para niveles de alta tensión en la década de 1920, utilizando aceite como medio aislante. Estos ensambles de interruptores aislados en aceite tenían mayor capacidad de conmutación que la aparellaje aislada en aire con un disyuntor de ráfaga de aire. La corriente nominal se elevó, pero también se incrementó el peligro de incendio con fuertes efectos para las subestaciones.

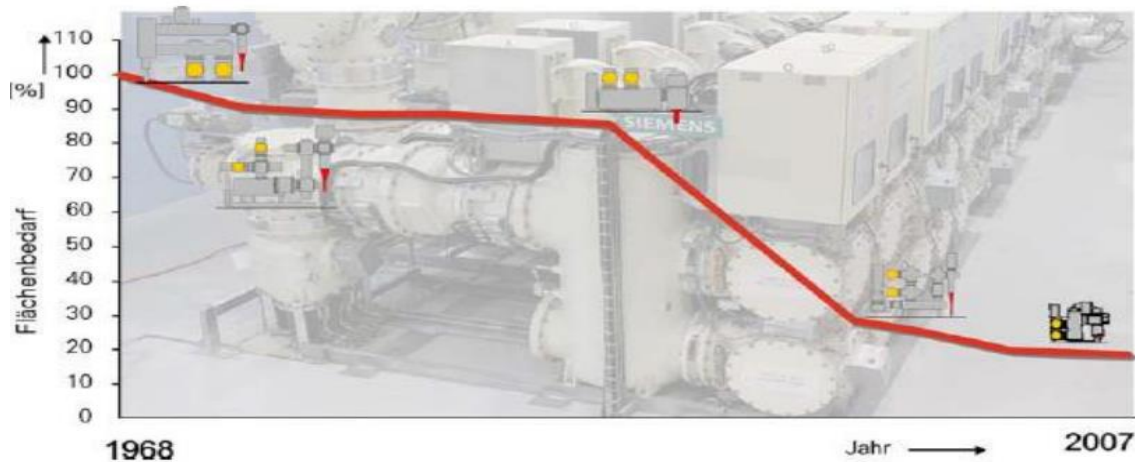
El primer aparellaje con envolvente metálica aislada con gas utilizaba freón como gas aislante, que tenía ya se conoce en la tecnología desde la década de 1930.

El aparellaje aislado se introdujo en el mercado en 1968, utilizando SF<sub>6</sub> como aislante y medio de extinción de arco por primera vez. Uno de los primeros GIS instalados en Berlín, Alemania, en 1968 en la Subestación Wittenau para tensión nominal de 110 kV.

El diseño GIS de la primera generación de tecnología SF<sub>6</sub> utilizó acero como envolvente en ese momento no se había desarrollado procesos de moldeo de aluminio herméticos para el gas SF<sub>6</sub> y también los tamaños posibles en este momento para un molde de fundición de aluminio estaban limitados.

Conforme se fue desarrollando la tecnología GIS desde 1965, año en que se utilizó por primera vez, ha ido disminuyendo el tamaño de los componentes desarrollados, como se puede ver en la ilustración 1.

Ilustración 1 Reducción del tamaño de GIS – tensión nominal 145 kV



*Nota: Extraído de Siemens AG*

Si bien es notable el impacto ambiental que un posible proyecto puede provocar en su realización y puesta en marcha de tal, el impacto del SF<sub>6</sub> se puede confirmar en lo siguiente: “el dióxido de carbono es el gas de efecto invernadero (GEI) más abundante no se acerca al SF<sub>6</sub> en términos de potencia. Este gas fluorado puede durar en la atmósfera durante 3.200 años antes de ser descompuesto por los rayos UV y es 22.800 veces más eficaz que el CO<sub>2</sub> atrapando la radiación infrarroja en la atmósfera, según la Agencia de Protección Ambiental. De hecho, el SF<sub>6</sub> tiene el mayor Potencial de Calentamiento Global (PCG) de todos los gases conocidos”. (Vega, 2020).

A pesar del peligro ambiental se ha logrado implementar satisfactoriamente en otras partes de Latinoamérica como lo es la consolidación de las subestaciones encapsuladas en gas GIS en la minería chilena y se observa su presencia en las bahías aisladas en gas que están siendo suministradas en el proyecto de ampliación de la Central Hidroeléctrica de Machu Picchu , Cuando

se construye subestación con tecnología Gas Insulated Switchgear (GIS), se espera que el indicador que más peso tenga en la aprobación del proyecto sea la confiabilidad que se puede obtener en la red al modificarla y añadiendo valor a la seguridad de la instalación. Se espera entonces mostrar una alternativa para que las empresas de transporte de energía y las instituciones gubernamentales tengan en cuenta los beneficios y las remuneraciones que se logran mejorando el crecimiento urbanístico de la ciudad. (CHACÓN, 2018)

En partes de centro américa como en Costa Rica la aplicación de esta tecnología ha dado resultados satisfactorios notorio en la siguiente cita: “Tras más de siete días, la subestación ha cumplido con las expectativas y trabaja con normalidad. Esta obra eléctrica es la primera del país edificada sobre una isla artificial, por lo que fue necesario disminuir el área de construcción a una décima parte de lo tradicional. Además, emplea tecnología de punta GIS o aislada en gas”. (Summa, 2019).

## Justificación

Según ha señalado Escalada (2002, pag.5) detalla que las dimensiones de las subestaciones GIS es muy reducida, con una reducción en su volumen del 3% al 8% del que le corresponde a una AIS de la misma tensión nominal y para las mismas funciones, del mismo modo queda definida la reducción del área ocupada entre el 3% al 12% de modo que produce un ahorro económico enorme debido al elevado precio de los terrenos de las ciudades densamente pobladas, sumado a la dificultad de instalar las subestaciones AIS en un espacio limitado como lo es cerca de centrales hidráulicas, cercanas a industrias con altos niveles de contaminación o en terrenos escarpados resulta apropiado tener a disposición la instalación de subestaciones GIS como opción, cabe mencionar los beneficios económicos enormes como lo es compatibilidad con el medio ambiente, alta disponibilidad de servicio y seguridad operacional y de personal mejorada.

Con el inherente crecimiento poblacional, que deriva en un notorio aumento de la demanda eléctrica resulta imperativo tener a disposición el espacio que se obtendría al implementar la tecnología GIS en ubicaciones importantes que permitan aprovechar el área desocupada tanto para aumentar la capacidad de una subestación GIS previamente construida o en beneficio de instalaciones aledañas, cabe resaltar la necesidad de cambiar de tecnología a través de un proceso que determine de manera eficaz el modo de proceder de implementación de la tecnología de manera tal que se reduzca el tiempo de instalación de esta tecnología donde hubo una subestación convencional de tipo AIS(Air isolated substation) evitando así las molestias de un periodo de instalación extendido de manera que resulte en un proceso admisible a capacitaciones y estas vayan a adaptar al operario a alcanzar los tiempos de reparaciones a rangos admisibles en comparación a los esfuerzos de operarios de mantenimientos del extranjero teniendo en consideración el espacio habilitado para construir una posible ampliación de este tipo de subestación o algún otro tipo de

instalación respetando las distancias de seguridad del terreno que no incida en un riesgo para las personas e instalaciones circundantes en vista del evidente crecimiento de la demanda la implementación de este tipo de tecnología será una gran opción a considerar, para cuando se presente estas dificultades

## Objetivos

### Objetivos Generales

- Proponer un método práctico de transición tecnológica de las subestaciones AIS a GIS existentes en Nicaragua.

### Objetivos Específicos

1. Determinar un proceso de transferencia tecnológica acorde y pertinente al diseño de una subestación GIS.
2. Modelar el proyecto hipotético de modernización de la subestación Altamira de AIS a GIS ejecutando estudios de cortocircuito y flujo de potencia en PSS®E que permitan crear, y modificar rápidamente sus modelos.
3. Establecer las pautas que permitan integrar la tecnología GIS incorporando sus beneficios técnicos de forma eficiente, rápida y continua.

## Diseño metodológico

Debido a que este trabajo investigativo se centra en la elaboración de un manual para la transición tecnológica de las subestaciones AIS a GIS en Nicaragua, usando como ejemplo un proyecto hipotético de modernización de la subestación Altamira de AIS a GIS, introduciendo conceptos típicos de la tecnología GIS, se decidió utilizar el método científico; específicamente el diseño metodológico exploratorio secuencial.

A continuación, se detallan las etapas del proyecto investigativo:

### **Determinar un proceso de transferencia tecnológica acorde y pertinente al diseño de una subestación GIS:**

Se realizará una inspección interna de los conceptos de proceso de transferencia, sus tipos, modelos y pasos a realizar enlazándolo con el aspecto técnico eléctrico de implementación de una subestación GIS, con el fin de seleccionar de manera adecuada los pasos del aspecto técnico eléctrico del establecimiento de subestaciones GIS.

### **Modelar el proyecto hipotético de modernización de la subestación Altamira de AIS a GIS ejecutando estudios de cortocircuito y flujo de potencia en PSS®E:**

Se modelará los distintos elementos antes seleccionados y la configuración adecuada de conexión con el Sistema interconectado nacional de la simulación para el caso de la subestación Altamira en Nicaragua comprobando los elementos seleccionados a través del estudio de cortocircuito permitirá llevar a cabo simulaciones de perturbaciones y eventos que afectan la correcta operación del sistema, así como evaluar su respuesta ante desastres de carga y transferencias automáticas, determinar tiempos críticos para despeje de faltas y arranque de generadores y el estudio de flujo de potencia para determinar la condición óptima de operación

para modos de operación normales, de baja demanda o de máxima demanda; tales como el ajuste adecuado de los equipos de control de voltaje, o cómo responderá la red eléctrica bajo condiciones anormales. .

**Establecer las pautas que permitan integrar la tecnología GIS incorporando sus beneficios técnicos de forma eficiente, rápida y continua:**

Esto se logrará a través de una investigación regresiva de distintos proyectos que hayan aplicado la tecnología GIS, tomando como fuentes instituciones como IEEE, NEMA, ANSI, etc. Recopilando datos necesarios que deban analizarse para lograr seleccionar las pautas.

## Proceso de Transferencia tecnológica

Es el proceso en el que se transfieren habilidades, conocimiento, tecnologías, métodos de fabricación, muestras de fabricación e instalaciones entre los gobiernos o las universidades y empresas privadas para asegurar que los avances científicos y tecnológicos sean accesibles a un mayor número de usuarios que puedan desarrollar y explotar aún más esas tecnologías en nuevos productos y crear valor, procesos, aplicaciones, materiales o servicios.

Castro Díaz-Balart, F. (2002), propone, que la transferencia de tecnología abarca el conjunto de las siguientes acciones:

- Venta o cesión bajo licencia de cualquier forma de propiedad industrial. Los derechos de propiedad industrial constituyen una especie de monopolio que posee el inventor y tienen como objetivo estimular la investigación y la aplicación de sus resultados en beneficio del mercado.
- Transmisión de conocimientos técnicos especializados y experiencias, bajo la forma de estudios de fiabilidad, planos, modelos, manuales. Fórmulas detalladas o instrucciones específicas.
- Transmisión de conocimientos tecnológicos para adquirir, instalar y utilizar máquinas, materiales o bienes intermedios.
- Transmisión de conocimientos tecnológicos necesarios para la instalación, operación y funcionamiento de proyectos.

- Materiales destinados a la formación de personal y servicios, tanto de consultoría como de gestión, prestados por personal especializado.

El propósito de las colaboraciones para transferencia tecnológica es impulsar el desarrollo y crecimiento de los diversos sectores de la sociedad mediante el acceso al conocimiento y experiencia de los grupos de investigación, innovación y desarrollo o evolución tecnológica.

Las intenciones de las transferencias tecnológicas son:

- Transferir conocimiento y habilidades entre los diferentes sectores productivos para estimular la economía.
- Impulsar el desarrollo, formación y capacitación de excelencia de los integrantes de las diversas organizaciones e instituciones.
- Incrementar el interés por las actividades de investigación y formación académica en el sector productivo de la región.
- Generar productos y actividades explotables desde el punto de vista comercial, derivados de la innovación tecnológica.
- Generar nuevos espacios de inversión para el sector privado en las áreas de innovación tecnológica, basados en activos de propiedad industrial tales como patentes.
- Crear espacios de colaboración y licencia tecnológica entre los diferentes sectores involucrados.
- Generar valor y competitividad en las compañías.

- Generar propiedad intelectual e industrial.

Los proyectos de transferencia tecnológica impulsan la competencia y los beneficios económicos de las instituciones y organizaciones.

El origen de la tecnología a transferir puede venir de universidades, centros de investigación, laboratorios, centros tecnológicos, otras empresas, nacionales o foráneas. Hay que tener presente que transferir tecnología implica adquirir o acceder al conocimiento.

Si bien las transferencias tecnológicas tienen una serie de pasos necesarios para consolidar el conocimiento en las instituciones a las cuales va dirigidas, como sigue:

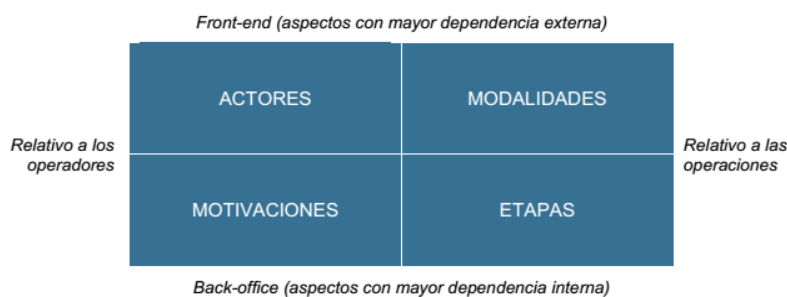
1. **Selección de la tecnología:** consiste en la identificación de las necesidades de la tecnológicas de la empresa receptora, y la búsqueda de información de las tecnologías disponibles y las condiciones que estipula el proveedor de la misma para cederla.
2. **La negociación:** Etapa en la cual las partes se ponen en contacto con el fin de determinar las condiciones y términos del acuerdo, por medio del cual se concederá la tecnología.
3. **La absorción o consolidación:** Etapa en la cual ya se han adquirido formalmente los conocimientos y equipos traspasados, pero estos deben ser analizados y dominados a cabalidad para lograr el éxito de la transferencia.
4. **La adaptación:** Aun cuando la tecnología importada no haya sido recreada de acuerdo a las características de la empresa receptora, ni para las condiciones en las cuales se desenvuelve, la misma debe promover los cambios y adaptaciones necesarias para que dicha tecnología pueda ser aplicada con la misma efectividad.

5. **La reproducción:** Se debe de realizar en conjunto con las dos etapas anteriores, es cuando la empresa receptora ya ha empezado a aplicar industrialmente una tecnología adquirida y ya se observan resultados.
6. **La difusión:** Se hace necesario que otras empresas, entidades y centro de investigación conozcan sobre la nueva tecnología importada, la cual puede resultarle de gran utilidad no solo por parte de quien adquiere la tecnología, sino también para la economía del país.
7. **Mejoras e innovaciones:** Se concibe como la última etapa del proceso e implica que el que adquiere la tecnología llegue a dominarla y lo demuestre con la creación de mejoras o incluso innovaciones sobre la tecnología adquirida, que propicie la suficiencia tecnológica de la rama.

#### Elementos del proceso de transición tecnológica

Es considerado como el conjunto de acciones que se realizan para materializar el paso de la tecnología desde su origen a su destino, de este modo se delimitaran estos con el fin de que quede determinado el alcance, motivos y actores involucrados con los pasos o etapas previamente explicados de la transición tecnológica.

*Ilustración 2. Elementos del proceso de transición tecnológica*



Nota: extraído de "Manual de transferencia tecnológica y conocimiento". De Javier González Sabater

Actores: Se trata de las partes, operadores o agentes involucrados en el proceso de transferencia de tecnología; Proveedor de la tecnología (suministrador o generador) en el manual propuesto se tiene como principal suministrador la empresa privada extranjera que pueda brindar la tecnología GIS, Receptor de la tecnología (usuario o cliente) el mayor beneficiario de esta tecnología seria la industria (indirectamente o directamente) y la empresa de transmisión eléctrica nacional, Intermediario del proceso (acelerador, facilitador, dinamizador, asesor, difusor...) que quedaría seleccionada la administración pública.

Modalidades: se entiende como las diferentes tipologías, enfoques o puntos de vista, Según la formalidad de la colaboración se tendrán acuerdos formales-informales de manera tal que existencia de un consenso entre las partes para realizar la transferencia, generalmente materializado mediante un contrato o acuerdo escrito que gobierna el proceso de transferencia y a través de: conversaciones puntuales con expertos, visitas a instalaciones, estudio de documentación técnica (documentos de patentes y diseños, artículos científicos, revistas técnicas, libros...), etc. Y según el enfoque de la transferencia el de acceder a la tecnología a través de su compra al proveedor.

Motivaciones: son las razones, causas o factores que originan, impulsan y/o condicionan la transferencia de tecnología, las cuales pueden tener diferentes dimensiones tales como sus principales beneficios tecnológico, económico, estratégico (competitivo) y comercial (de mercado) en la tecnología GIS (Tabla 1).

Tabla 1. Beneficios de tecnología GIS con respecto a las subestaciones convencional.

| Ítem | Subestaciones eléctricas AIS                                                      | Subestaciones eléctricas GIS                                                          |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Vulnerable a cambios ambientales demorando así el restablecimiento del suministro | Soporta condiciones ambientales críticas y mantiene la estabilidad del sistema.       |
| 2    | Menor seguridad a electrocución                                                   | Mayor seguridad operativa ante contactos eléctricos o descargas por tensiones de paso |
| 3    | No requiere monitoreo de su aislante natural                                      | Requiere de comprobación de las presiones de SF6 (densidad) según módulo.             |
| 4    | Mayor espacio                                                                     | Menor espacio                                                                         |
| 5    | Es manual la relación máquina y hombre                                            | Fácil la interfaz entre máquina y hombre                                              |
| 6    | Costos anuales mayores                                                            | Costos anuales menores (equipos considerados libres de mantenimiento anual)           |
| 7    | A diferentes altitudes el costo de mantenimiento es mayor                         | Menor y mayor altitud son menor y bajo costo de mantenimiento                         |
| 8    | Mayor costo por espacios físicos                                                  | Ahorro en espacios físicos                                                            |
| 9    | Costos por interrupciones es similar a la GIS                                     | Costo de interrupciones programadas es mucho menor                                    |
| 10   | Costos iniciales menores                                                          | Costo alto para su adquisición como equipo                                            |
| 11   | Mayor tiempo de montaje                                                           | Menor tiempo de montaje                                                               |

Nota: Elaboración propia.

Si bien esos son los pasos generales se encuentran distintos modelos de integración tecnológica, el cual se puede consultar «Los modelos europeos de transferencia de tecnología universidad-empresa», presentado por María Teresa Aceytuno Pérez de la Universidad de Huelva y F. Rafael Cáceres Carrasco de la Universidad de Sevilla en la XIII reunión de Economía Mundial, se abordará el que se utilizará para la transferencia de la tecnología GIS.

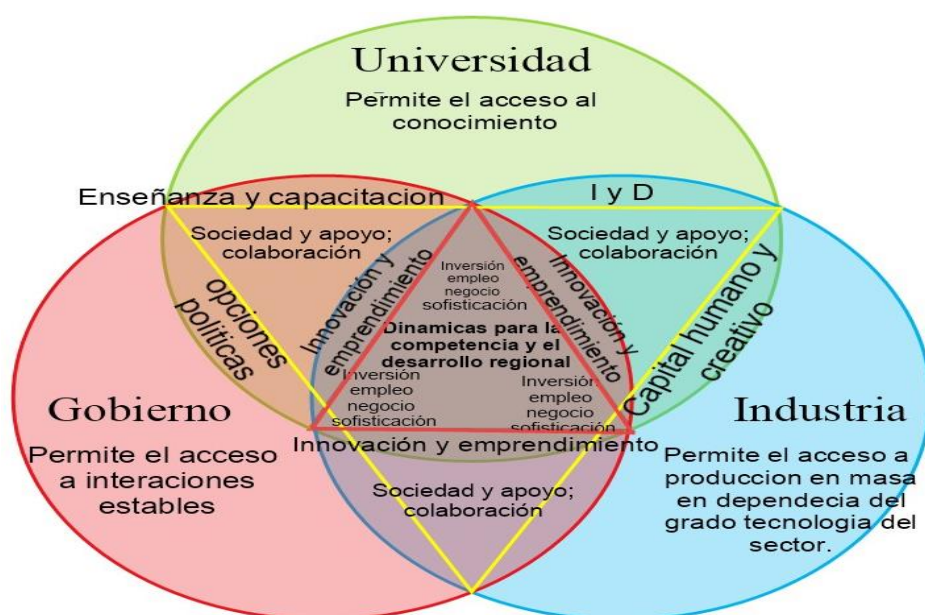
#### Modelo Triple hélice.

Este modelo resalta la tríada Empresa-Universidad-Estado. La Silicon Valley en EE. UU. y Cambridge en el Reino Unido, son los ejemplos más representativos del rol desempeñado por los tres actores. Básicamente ambas experiencias consistieron en la concentración de pequeñas empresas de alta tecnología, en telecomunicaciones, software y biotecnología, de las cuales muchas comenzaron como filiales de la Universidad a cargo de personal académico o graduados. Sus principales actividades son asesoría técnica y

tecnológica, generando una cultura de negocios, de riesgo y de investigación. Por otro lado, los países nórdicos y los asiáticos presentan en cambio un modelo de mayor institucionalización, donde los gobiernos además de crear condiciones para la transferencia tecnológica, desde lo jurídico, emiten políticas públicas de gran envergadura para generar cambios estructurales en la producción.

Estos entes (política, industrial y académica) emergen en una nueva organización de la economía basada en el conocimiento con particulares características: transformación interna en cada hélice, influencia de una esfera a otra, una fuerte creación de redes que estimulan la creatividad organizacional, cohesión regional, institucionalización, reducción de incertidumbre, aumento de confianza, donde surgen nuevas ideas y proyectos que no hubieran surgido en las esferas aisladas.

*Ilustración 3. Modelo de Triple hélice*



Nota: Elaboración propia.

En este sentido, es conocido el modelo de la triple hélice, que relaciona la universidad y los centros públicos de investigación con las empresas y la Administración Pública en el proceso de innovación, y donde, el éxito del sistema depende de las relaciones entre los agentes que interactúan en él, es considerado, también, como un modelo triple hélice donde la Empresa, la Universidad y el Estado se alinean en pro de un objetivo, la Transferencia Tecnológica.

Debido a la influencia que tiene el estado sobre el sector energético de Nicaragua y al aumento inherente del consumo energético que conlleva el desarrollo general del país (social, industrial, tecnológica, económico, turístico, etc.) y el alto beneficio que resultaría de llevar a cabo de manera racional este tipo de proyectos en conjunto con las instituciones académicas adecuadas que permitan retroalimentar la información apropiada a sus docentes, alumnos, de manera tal, sea posible informar de los beneficios y perjuicios resultantes de la realización de este tipo de proyectos y de la manera en que se realizó el proyecto tanto lo antes estructurado junto con sus postergaciones indistintamente sea la naturaleza de modo que pueda ser analizado y prevenido dentro de lo posible o gestionar los cambios en lo planificado en futuros proyectos que no afecte a la realización de los proyectos venideros, a la recopilación de la información durante la realización del proyecto y a la integridad del proyecto mismo, que cumpla con las expectativas y requisitos de las partes interesadas, al tiempo que se adhiere a los estándares y la ética.

Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionó el modelo de triple hélice ya que convergería las acciones del sector gubernamental, el sector empresarial y el sector académico en el sentido de desarrollar y transferir exitosamente esta tecnología y debido al

estado actual de la política nicaragüense. De los tres modelos delimitados por Etzkowitz, el primer modelo trabaja cada sector de forma individual, pero con un objetivo conjunto, el segundo modelo trabaja dos sectores bajo la influencia de otro (normalmente el de gobierno), y el tercero es un trabajo unido para lograr los objetivos. Éste último es el más utilizado en la actualidad por países como Suecia y Alemania en Europa, Estados Unidos y más recientemente también por México.

En lo cual se utilizará el tercer modelo de triple hélice llamado también de convergencia, este modelo logra que las esferas institucionales de una Triple Hélice sean relativamente independientes y al mismo tiempo puedan interactuar unas con otras, por medio de interacciones por funciones (únicas y compartidas) en los campos externos de esas esferas.

El primer nivel es el gobierno que se enfoca en la solución de problemas de orden nacional a través del desarrollo industrial y científico. En el segundo nivel están las organizaciones que gestionan la investigación y desarrollo tecnológico, las cuales se centran en ser facilitadoras efectivas para conectar al Estado, a las empresas y a las universidades o institutos de investigación; tienen relaciones cercanas al gobierno y sus ministerios y a la industria de donde obtienen recursos; son instituciones que lideran programas y proyectos acordes con las políticas definidas por el gobierno, y cuyos resultados son posteriormente incorporados a la industria; además hacen actividades como: identificación de tecnologías, promoción, comercialización y transferencia de tecnología, marketing de tecnología, y establecimiento de relaciones internacionales. El tercer nivel son los agentes (compañías

privadas, universidades, institutos públicos de investigación y divisiones industriales) encargados de ejecutar los proyectos liderados por las instituciones del segundo nivel.

Triple Hélice denota no sólo la relación entre estas tres esferas, sino también la transformación interna dentro de cada una de ellas (Etzkowitz, Leydesdorff, 2000). De manera que la industria opera como el lugar de la producción, la universidad como el recurso de nuevo conocimiento y tecnología, y el gobierno como el recurso de relación contractual que garantiza estabilidad en la interacción y el intercambio (Etzkowitz, 2003). En este sentido, el gobierno tiene un papel facilitador a través del marco regulatorio y de políticas que facilitan la cooperación entre la industria y la universidad (Luengo, Obeso, 2013) en donde la investigación universitaria avanza en el conocimiento, en la ciencia y en la ingeniería básica, proporcionando los nuevos conocimientos y los graduados técnicos para las industrias

Bagheri Moghadam propone un modelo descriptivo (Ver Ilustración 4) donde se mapean por niveles los agentes que intervienen en la investigación.

*Ilustración 4. Modelo descriptivo de agentes de la triple hélice.*



Nota: extraído de <https://www.revistaespacios.com/a15v36n24/15362422.html>

### *El papel de la universidad en el modelo*

Para empezar, las universidades tradicionalmente se han visto como un soporte estructural de la innovación, la cual proporciona personal capacitado, resultados de investigaciones y conocimiento a la industria (Etzkowitz, 2003). También, se cree que la cooperación universidad-industria ayuda a aumentar tanto la productividad industrial como la eficiencia de la educación en la universidad (Bektaş, Tayauova, 2014). De hecho, en la actualidad hay una necesidad de crear organizaciones de aprendizaje en lugar de silos organizacionales y son precisamente estas nuevas organizaciones las que han de traer oportunidades y necesidades de nuevas industrias a múltiples sectores. Ante esta situación, las universidades pueden y deben estar en una posición estratégica para responder a esas nuevas demandas (Nyman, 2015), planteando así un reto importante para las instituciones de educación pues son consideradas institucionalmente menos potente que las otras dos esferas. Sin embargo, no se debe desconocer que la universidad tiene fortalezas específicas como son la afluencia continua de nuevos conocimientos (por ejemplo, publicaciones y patentes) y los nuevos portadores de conocimiento (estudiantes). De ahí que la universidad sea considerada como un soporte fundamental del sistema de innovación basada en el conocimiento (Leydesdorff et al. 2010).

Esta transformación hacia organizaciones de aprendizaje, en la que la universidad debe jugar un papel importante, debe estar anclada en el desarrollo de espacios de conocimiento, consenso e innovación. Dichos espacios deben ser generados a través de la interacción entre las universidades, el gobierno y la industria (Lopes da Silva et al. 2012). Por tanto, las asociaciones estratégicas Universidad-Industria-Estado representan una forma

de organización diseñada para integrar piscinas dispares de capital intelectual donde los participantes en la asociación llevan a la mesa muy distintas competencias, capacidades y contextos organizacionales. Justamente esto lleva a que la alianza entre las asociaciones se convierte en una comunidad compartida de innovación en la que cada participante conserva el legado de sus orígenes y socializa en una red con valores, normas, vocabulario (Carayannis et al. 2000), y el conocimiento de cada organización, de tal manera que todo esto pueda integrarse en el nuevo contexto de una comunidad de la innovación, para ser aplicada por cada participante hacia sus propias metas de aprendizaje (Carayannis et al. 2000).

Para resumir, la cooperación de la industria con la universidad en términos de eficiencia de entrenamiento proporciona las siguientes ventajas: ayuda a los docentes a actualizarse a sí mismos, proporcionándoles la base para llevar a cabo la investigación científica, apoya la realización de investigaciones para el desarrollo de las ciencias básicas, contribuye al conocimiento científico mediante la publicación de la investigación y la preparación de los estudiantes para la vida práctica. Dentro de los métodos necesarios para la eficiencia de la colaboración entre la industria y la universidad se encuentran el mejoramiento de las conexiones entre instituciones de educación superior y la industria, la realización de conferencias y visitas técnicas, pasantías, el aumento de períodos de prácticas y la asignación de estudiantes a proyectos de interés para la industria (Bektaş,Tayauova, 2014),la universidad se vuelve un ente integrador de políticas públicas, a partir de la integración y retroalimentación entre estos tres entes. Es válido destacar que, en las relaciones desarrolladas, las universidades y los institutos públicos de investigación apoyan las empresas privadas y promueven la publicación de trabajos por empresas privadas (Hayashi, 2003).

La vinculación es un proceso dinámico y cambiante, que se plantea como un nuevo paradigma entre los tres elementos de la Triple Hélice; tal como se ha planteado a partir del análisis y aplicación del modelo propuesto por Henry Etzkowitz..El término vinculación alude un matiz donde los términos de difusión y extensión, son considerados como parte del vocabulario de los especialistas de la educación superior, este término enfatiza la relación existente entre la universidad con industrias, empresas del sector productivo del país, éstas últimas suelen ser de capital privado, lo que ha generado algunos cambios desde el ámbito social y político, al mejoramiento continuo de los sistemas tradicionales.

#### *Factores Facilitadores:*

La tendencia en los últimos años, sobre la creación de nuevas formas de conocimiento, de nuevas formas de cooperación y de alianzas, la creación de nuevas formas de capital y la creación de empresas (pequeñas y de alta tecnología, spin off, han sido aspectos que han facilitado el desarrollo de la vinculación entre la universidad-empresa. Esta amplia gama de aspectos considera la importancia en el desarrollo de las actividades propias tanto de la universidad y la empresa, sin dejar de lado las actividades propias que se desarrollan en cuanto a las políticas públicas de un gobierno.

En el tanto que pueda generar, aparte de su actividad propia de enseñanza-aprendizaje, investigación y desarrollo a lo interno de la universidad y de la misma manera pueda participar en la creación de nuevas empresas o incentivar las spin-off (empresas pequeñas y de alta tecnología).Dando la oportunidad de formular una especie de universidad emprendedora que abarca la comercialización, la coinversión del conocimiento en

mercancías (patentes, licencias o start-ups propiedad de estudiantes o facultades), comercializando el conocimiento que producen.

Se generan, mecanismos de cooperación en varios sentidos: por un lado, apoyo a la investigación que realizan las universidades y la transmisión de conocimiento. En cuanto a la investigación, las empresas tienen la posibilidad de facilitar recursos a la universidad con el propósito de equipar, e impulsar proyectos a través de donaciones o becas.

Se capacita personal docente y se impulsa la creación de empleo para estudiantes. Con la incorporación de la investigación en las actividades académicas de una universidad, se manifiesta la necesidad de capacitar al personal académico, con el propósito de contar con profesionales con conocimientos acordes a las necesidades que la política universitaria esté llevando a lo interno de la institución. Es así, que se generan tanto nuevas fuentes de empleo a lo interno de la universidad como a lo externo, con la necesidad de la incorporación de los profesionales que la universidad está incorporando a la sociedad.

### *Gobierno*

Implica para su adecuado funcionamiento una participación activa del gobierno a través de la legislación, instrumentos e incentivos fiscales propicios para el fomento y dinamismo de las relaciones universidad-empresa. Por otro lado, el desarrollo de una legislación que incentive el desarrollo de las empresas en el interior de las universidades, beneficia en gran medida la vinculación empresarial con la universidad.

### *Empresa:*

Los cambios frecuentes en la tecnología propicia un ambiente de constante generación de nuevos conocimientos, y así se puede estimular el crecimiento en las empresas a través de mecanismos de cooperación con las universidades; involucrándose éstas últimas en el desarrollo de capacidades que ayuden a las empresas por medio de las universidades a implantar nuevas formas para crear fuentes de innovación para el desarrollo de altas tecnologías en las empresas. Esto se puede lograr a través de incubadoras de empresas, oficinas universitarias de transferencia tecnológica, e institutos tecnológicos que coordinadamente establezcan vínculos para el desarrollo de las nuevas tecnologías.

### *Obstáculos:*

Las políticas públicas: Las universidades públicas, están estrechamente relacionadas con las políticas que un gobierno pueda establecer a lo interno de un país, de esta forma una política pública que vaya en detrimento de cualquier actividad que realiza la educación superior, puede causar un paso atrás en las actividades de desarrollo que esta pueda estar realizando. Es así, que deben existir tanto de parte del gobierno, actitudes que ayuden a generar este tipo de actividad, sin perjudicar el desarrollo de las actividades propias que conlleva la universidad.

Procesos Administrativos: La universidad se enfrenta ante una realidad que es la burocratización de los procesos, esto en lugar de ayudar a que los procedimientos se agilicen, más bien entorpecen el accionar tanto de la empresa, como de la misma universidad. Los proyectos de investigación generan procesos de aprobación por parte de la universidad, que

generalmente son lentos y de mucho papeleo, aspecto que genera para la empresa un obstáculo a la hora de la aprobación de éste. •

Objetivos encontrados: Tanto la universidad como la empresa, tiene sus propios objetivos, por parte de la universidad se interesa por desarrollar actividades académicas que le genere fuentes de financiamiento tanto para sus proyectos, como para sus investigadores; en el tanto que la empresa se interesa en el rendimiento que esta investigación pueda generar a la empresa. Es así, que se genera una barrera, en el cual se enfatiza en quién tendrá el desarrollo del resultado de la investigación, por lo cual la titularidad de los resultados de la investigación suele ser una barrera que enfrentan ambas partes; ya que con estos pueden generar altos rendimientos que a ambos les interesa obtener.

Falta de capacitación: La capacitación de los universitarios es un aspecto que debe desarrollarse para obtener resultados óptimos en el desarrollo de nuevas investigaciones por parte de la universidad. Existe una carencia a nivel general en las universidades de profesionales capacitados para el desarrollo de nuevas formas de investigación y desarrollo, por lo que, la capacitación en este sentido, cobra mayor relevancia.

Carga académica: A lo interno de las universidades, se establecen cargas académicas para los docentes o investigadores. Esto genera una serie de conflictos a lo interno de las universidades, ya que, si bien es cierto que se quiere incursionar en la investigación, se establecen tiempos completos para el desarrollo de la actividad académica (enseñar, investigar, tutorías, servicios propios del desarrollo docente en la universidad), que se ven

afectados o que no son realmente justificados en el tiempo para las actividades que se generan de la cooperación con la empresa.

### *Condiciones para el éxito de la cooperación*

Para que la cooperación entre instituciones sea exitosa y el ambiente de innovación sea propicio para la maduración de la estructura de la Triple Hélice son necesarias tres condiciones para el éxito. La primera de ellas se refiere a la información debido a que se requiere más información relacionada con las capacidades de la universidad para la resolución de problemas y sobre el conocimiento que necesitan las empresas o el grupo de empresas. La segunda condición es que se dé efectivamente el contacto entre las instituciones. Una sugerencia en este sentido es el diseño de una estrategia 'nicho', es decir, centrarse en algún tipo de empresa o sector productivo. La última condición es la legitimación y visibilidad de la idea misma de tal forma que ambos actores (Universidad y Empresa) pueden esperar una mejora sustancial de sus encuentros (Sutz, 2000), pues al combinar la teoría (academia) con la práctica (industria) se acelera el proceso de aprendizaje y se facilita la transferencia de conocimientos en el campo de la producción. En este contexto, la adopción de medidas gubernamentales para promover la cooperación es una parte central para cumplir el objetivo de optimización de los recursos (recursos humanos, capital, tecnología, recursos naturales) y aseguramiento del desarrollo sostenible y la mejora (Bektaş, Tayauova, 2014).

En cuanto al papel del gobierno como esfera encargada de dar la estabilidad a la estructura de innovación y propiciar el ambiente para la cooperación entre las instituciones que hacen parte del sistema, éste debe tomar medidas que mejoren la actitud innovadora de

las empresas comerciales y que conecten los principales actores dentro del sistema de innovación. Estas medidas se desarrollan mediante programas que tienden a fomentar vínculos más estrechos entre la investigación pública y las expectativas del sector privado, pero tienen una deficiencia al influir en un número limitado de actores, generando que las interacciones sean bastante limitadas y se retrase la transición hacia la economía basada en el conocimiento o la economía basada en el aprendizaje (Inzelt, 2004).

## Descripción técnica

La red de transporte se encarga de conectar los grandes centros de producción, geográficamente muy dispersos, con los grandes núcleos de demanda, normalmente ubicados cerca de ciudades y zonas industriales, también mantiene la operación global del sistema eléctrico en sincronismo.

Las subestaciones GIS tienen sus partes bajo tensión aisladas en gas **hexafluoruro de azufre** ( $\text{SF}_6$ ), en lugar de aislación en aire como en las subestaciones AIS.

El gas  $\text{SF}_6$  puro es incoloro, inodoro, insípido y no tóxico, es químicamente estable y no inflamable. A temperatura y presión ambiente es gaseoso, y a 6.161 g/l tiene una densidad de masa de 4.7 veces la del aire. Ya que su temperatura crítica es de 45.6°C, el  $\text{SF}_6$  se puede licuar por compresión y, por lo tanto, puede almacenarse convenientemente como líquido.

Por otro lado, se debe evitar la licuefacción dentro de los interruptores automático ya que el cambio de fase de gas a líquido provoca una pérdida rápida de densidad del gas y una posible reducción en la capacidad de aislamiento del gas. La temperatura mínima

comúnmente especificada para instalaciones eléctricas exteriores es de  $-25^{\circ}\text{C}$  lo que implica que la presión máxima del gas a  $20^{\circ}\text{C}$  es de 1.9 bar (manométrica) lo cual se puede usar sin calefactores. Sin embargo, esta limitación se compensa con la rigidez dieléctrica superior del  $\text{SF}_6$ . A una presión dada, el  $\text{SF}_6$  tiene una rigidez dieléctrica varias veces superior a la del aire y a una presión de 1.9 bar tiene una rigidez dieléctrica equivalente a la de los aceites utilizados en interruptores de potencia.

Por supuesto, la elección de  $\text{SF}_6$  para su uso en interruptores automáticos de alta potencia no depende únicamente de su buena rigidez dieléctrica, sino también de sus excelentes propiedades de control y extinción del arco eléctrico. Para entender las diversas formas en que se logra la extinción del arco es necesario conocer las propiedades del  $\text{SF}_6$  a temperaturas elevadas de hasta unos 20 000 K. En tales temperaturas el  $\text{SF}_6$  se disocia en un gran número de fragmentos, por lo que el gas, que es inerte a temperatura ambiente, se compone de iones químicamente reactivos. En consecuencia, se requiere una elección cuidadosa de los materiales para la construcción de la cámara de extinción del arco eléctrico, así como la necesidad de una alta pureza del  $\text{SF}_6$ . (y, en particular, la ausencia de hidrógeno que podría conducir a la formación de fluoruro de hidrógeno). Muchos de estos fragmentos persistentes son tóxicos y son objeto de muchas investigaciones. Sin embargo, la formación de estos fragmentos químicamente reactivos y tóxicos contribuyen al buen control del arco eléctrico, extinción y recuperación de las propiedades dieléctrica del gas.

### **Aparellaje con aislamiento de gas:**

Un conjunto compacto de varios componentes, encerrado en una carcasa metálica puesta a tierra en la que el medio aislante primario es  $\text{SF}_6$  y que normalmente incluye buses, interruptores, disyuntores y otros equipos asociados.

### **Líneas:**

Se trata de cables de aluminio que descansan sobre torretas y que tienen como función conectar las subestaciones elevadoras con las subestaciones transformadoras. Eléctricamente la sección de los cables marca el límite máximo admisible de corriente que pueden transportar.

### **Especificaciones técnicas de la subestación:**

Las diferentes configuraciones se caracterizan por su embarrado. Se pueden proporcionar arreglos y, en general, cualquier número de circuitos repitiendo el patrón además de ser equipos indispensables para la buena operación de la subestación, entre los cuales se encuentran:

- Módulo de barra principales: conjunto de conductores eléctricos que se utilizan como conexión común de los diferentes circuitos que consta una **subestación**.
- Módulo de bahía de transformación.
- Módulos de bahía de líneas.
- Transformador de potencia
- Celdas de transformación, celdas de uso propio, celdas de equipos de medición.
- Servicios auxiliares (paneles de AC, DC, rectificadores y baterías) y transformador de servicio propio
- Sistema de red de tierra
- Sistema automatizado de control, protección y medida: Los sistemas de **control de bahía** integrados combinan **control** total de **bahía** con protección de interruptores de alta velocidad, para permitirle implementar una solución completa de protección, **control** y monitoreo de subestaciones que es flexible para su aplicación.
- Sistema de iluminación perimetral.

En lo cual se puede sacar una definición en común con varias partes de la subestación, la cual es bahía:

**Bahía** es un elemento de una **subestación**, conformada por equipos de maniobra: (interruptores, seccionadores) y equipos de protección, control, y medición.

La subestación consta de tres componentes principales:

- i) Sistema primario
- ii) Sistema Secundario
- iii) Sistema de Suministro Auxiliar

El sistema de suministro auxiliar comprende todos los equipos, como suministros de CA y suministros de CC que permiten el funcionamiento de los equipos de protección, control, medida y seguimiento.

a) Sistemas de suministro y distribución de CC: proporcionados para garantizar un suministro seguro. disponible en todo momento para alimentar los sistemas de protección, controlar los equipos e iniciar disparo de los interruptores automáticos y comprende:

Baterías: ya sea de plomo ácido o de níquel-álcali en clasificaciones de decenas de amperios horas a cientos de amperios hora a voltajes de 30V, 50V, 125V y 250V dependiendo de la aplicación.

Cargador de batería: generalmente voltaje constante, tipos de corriente limitada con carga de refuerzo instalación para alimentar cargas permanentes y mantener la batería completamente cargada mientras el suministro de CA auxiliar está disponible.

Tablero de distribución: como su nombre lo indica, proporciona un sistema de distribución, aislamiento y protección para suministros de CC a todos los equipos dentro de la subestación.

b) Suministros LVAC: un sistema auxiliar de suministro y distribución de CA que admite el funcionamiento de la subestación proporcionando energía para los motores de los ventiladores de refrigeración, toque cambio de motores, sistemas de carga y seccionador de mecanismo de disyuntor unidades además de las cargas normales de calefacción, iluminación y domésticas.

### Funciones principales de las subestaciones son:

- Elevar o Reducir parámetros de voltaje.
- Conexión o Desconexión de partes del sistema, entre dos áreas distintas, de igual o distinto nivel de voltaje (Interruptores o Cuchillas para desconexiones de circuito)
- Compensación de Reactiva.

### Potencia aparente o compleja

La potencia compleja de un circuito eléctrico de corriente alterna (cuya magnitud se conoce como **potencia aparente** y se identifica con la letra **S**), es la suma (vectorial) de la potencia que disipa dicho circuito y se transforma en calor o trabajo (conocida como **potencia promedio, activa o real**, que se designa con la letra **P** y se mide en vatios (W)) y la potencia utilizada para la formación de los campos eléctrico y magnético de sus componentes, que fluctuará entre estos componentes y la fuente de energía (conocida como **potencia reactiva**, que se identifica con la letra **Q** y se mide en voltamperios reactivos (var)).

$$S_n = \sqrt{3} * U_n * I_n$$

*Ecuación 1*

Al despejar la corriente nominal, la ecuación 1 quedaría como sigue:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_n}$$

*Ecuación 2*

$I_n$  = corriente de línea

$S_n$  = potencia aparente

$U_n$  = tensión de línea

De acuerdo con las normas IEC, la tensión de paso se define como la diferencia de potencial entre los puntos en la superficie del suelo, separados por una distancia de un paso, 1 m, en la dirección del gradiente de potencial máximo.

Asimismo, define la tensión de contacto como la diferencia de potencial entre la puesta a tierra estructura metálica y el punto de puesta a tierra de la superficie a 1 m de distancia en la dirección del gradiente de potencial máximo.

Las tensiones de paso y de contacto admisibles son los valores que no deben superarse en ningún momento. de la subestación para seguridad de las personas que circulan por ella.

Los valores máximos admitidos por el IEEE std 80 para estos parámetros están en función de la resistividad del suelo en su superficie y la duración de la falla.

Y el voltaje de contacto quedara determinado por la siguiente ecuación:

$$V_p = \frac{10 \times k}{t^n} \times \left(1 + \frac{6 \times \rho_s}{1000}\right) \quad \text{Voltaje de paso} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$V_c = \frac{k}{t^n} \times \left(1 + \frac{1.5 \times \rho_s}{1000}\right) \quad \text{Voltaje de contacto} \quad \text{Ecuación 4}$$

$\rho_s$  = resistividad superficial que toca el pie.

$k$  = factor de corrección por irregularidades para tomar en cuenta el flujo de corriente no uniforme de partes diversas de la red.

$t$  = duración de la falla en segundos.

$K=72$  y  $n=1$  para tiempos inferiores a 0.9 segundos

$K=78.5$  y  $n=0.18$  para tiempos superiores a 0.9 segundos e inferiores a 3 segundos.

Es necesario tener en consideración la definición de estudios de cortocircuitos y también los tipos de cortocircuitos para realizar con estos valores una selección adecuada de la aparellaje de la subestación GIS, el estudio de corto circuito tiene la finalidad de proporcionar información sobre corrientes y voltajes en un sistema eléctrico durante condiciones de falla entre los tipos de cortocircuitos a tener en cuenta en este estudio son fallo trifásico, fallo monofásico a tierra, fallo entre dos fases, fallo entre dos fases y tierra, en particular también hay que tener en cuenta estudios de flujo de potencia y estudios de fiabilidad en lo cual su definición de estos tres estudios se definirán que son, por que es necesario realizarlo. Y que beneficios ofrece a una compañía.

**Estudios de cortocircuito:** es un análisis de un sistema eléctrico que determina la magnitud de las corrientes que fluyen durante una falla eléctrica. Comparar esos valores calculados contra las clasificaciones de los equipos es el primer paso para asegurar que el sistema está debidamente protegido.

Un estudio de cortocircuito determina la corriente de falla disponible en varias ubicaciones a través de todo el sistema eléctrico, y si el equipo está clasificado adecuadamente para la corriente de falla. Para que este tenga la clasificación adecuada, sus necesidades de calificación de interrupción necesitan ser más grandes que la corriente de falla.

Lo mejor es llevar a cabo este estudio después de que el equipo eléctrico ha sido aprobado, pero antes de que llegue al sitio. Si se encuentra que no es apto para corriente de falla, todavía hay posibilidad de hacer los ajustes necesarios antes de que surja un problema. Esto representará un importante ahorro de tiempo y dinero. De no hacerlo, las consecuencias podrían ser desastrosas. El riesgo de destello del arco eléctrico, pérdida de energía y otros daños permanecerían latentes.

### **Beneficios de un estudio de cortocircuito**

- Certeza o no de que un equipo es apto para la corriente de falla durante un cortocircuito.
- Ayuda a evitar apagones y tiempo de inactividad.
- Esencial para evitar la interrupción de servicios esenciales.
- Reduce el riesgo de daños e incendios en los equipos.
- Incrementa la seguridad y evita **lesiones eléctricas** en las personas.
- Posibilidad de hacer cambios en los equipos antes de que sean instalados.
- Determina el nivel de dispositivos de protección que se necesitan.
- Provee la información necesaria para etiquetar correctamente.
- Permite cumplir con las regulaciones.
- Reduce el riesgo de que una instalación enfrente un evento catastrófico.
- Reduce el riesgo de pérdida de energía en el sistema eléctrico.

- Incrementa la confiabilidad de un sistema eléctrico y los equipos relacionados

**Estudio de flujo de potencia:** Durante el diseño de la infraestructura de un sistema eléctrico, un estudio de flujos de potencia realizado por un equipo calificado **garantiza que los procesos y los servicios no se verán interrumpidos, esto debido al flujo continuo de la potencia por el sistema.**

Este es usado ampliamente en la operación y la planeación de un sistema de potencia. Se trata de una herramienta fundamental para el análisis de este último. **Los cálculos determinan si un elemento específico de la infraestructura está en riesgo de sobrecargarse.**

En las operaciones, el estudio de flujos de potencia se realiza para asegurarse de que los generadores alcancen su capacidad operativa óptima, el **mantenimiento** pueda llevarse a cabo sin problema y el suministro de energía satisfaga la demanda satisfactoriamente. **El análisis también determina cómo operará el sistema con una carga específica.**

En teoría, el estudio muestra la descripción matemática de una red eléctrica, así como los cálculos que llegan a resultados satisfactorios.

El estudio de flujos de potencia se utiliza para investigar:

- Los componentes o la carga del circuito.
- Perfiles de voltaje del bus.
- Flujo de potencia real y reactiva.
- Pérdidas en el sistema de potencia.
- Los ajustes adecuados del *tap* (grifo) del **transformador**.

El estudio se lleva a cabo con un *software* que simula el estado actual de las condiciones de operación del sistema de potencia, permitiendo conocer lo ya mencionado arriba. **Hacer este análisis, utilizando distintos escenarios, permite asegurarse de que el sistema de potencia está adecuadamente diseñado para satisfacer los criterios de desempeño.** Un

sistema con esta característica significa hacer rendir al máximo la inversión inicial de capital en la infraestructura y los futuros costos de operación.

¿Qué puede hacer el estudio?

- Optimizar el uso de los circuitos.
- Desarrollar perfiles de voltaje prácticos.
- Minimizar las pérdidas de kW y kVAR.
- Desarrollar lineamientos para las especificaciones de los equipos.
- Identificar la configuración del *tap* del transformador.

**Beneficios:**

- Disminuir el tiempo de inactividad no planificado.
- **Reducir los costos** de mantenimiento y operación.
- Obtener más capacidad de los activos existentes.

Conocer los aspectos básicos de los flujos de potencia y entender su importancia en cualquier sistema eléctrico permite obtener un panorama muy claro al diseñarlo o incrementar su capacidad. **Se trata también de una herramienta que provee seguridad a los trabajadores de una instalación**, pues determina la mejor manera de mitigar riesgos como sobrecargas. Un estudio de flujos de potencia se requiere para cerciorarse de que la potencia fluye adecuadamente en todo momento, a pesar de fluctuaciones de carga normales y contingencias.

**Red de tierra:**

La instalación estará dotada de una malla de electrodos soterrada, Su objetivo es reducir la tensión de paso y de contacto a valores admisibles por la normativa, tanto para las personas que circulan por el interior como por el exterior de la instalación. todos los elementos metálicos no activos de la subestación se conectarán a la malla de tierra inferior.

Diseño en condiciones adversas.

En áreas donde la resistividad del suelo es bastante alta o el espacio de la subestación es escaso, puede que no sea posible obtener un sistema de puesta a tierra de baja impedancia extendiendo los electrodos de la rejilla sobre un área grande, como se hace en condiciones más favorables. Esta situación es típica de muchas instalaciones GIS y subestaciones industriales, que ocupan sólo una fracción del área de terreno normalmente utilizada para equipos convencionales. Esto a menudo dificulta el control de las pendientes de la superficie. Algunas de las soluciones incluyen:

- Conexión(es) de redes de tierra remotas e instalaciones de puesta a tierra adyacentes, un sistema combinado que utiliza instalaciones separadas en edificios, bóvedas subterráneas, etc. Un uso predominante de electrodos de tierra remotos requiere una consideración cuidadosa de los potenciales transferidos, las ubicaciones de los pararrayos y otros puntos críticos. Puede producirse una caída de tensión significativa entre las instalaciones de puesta a tierra locales y remotas, especialmente en el caso de sobretensiones de alta frecuencia (rayos).
- Uso de varillas profundamente enterradas y cajas de registro o pozos que logren una inspección adecuada a su debido momento.
- Diversos aditivos y tratamientos del suelo utilizados junto con varillas de tierra y conductores de interconexión. Como lo son
- Uso de mallas de alambre. Es posible combinar un material de superficie y mallas fabricadas a partir de malla de alambre para igualar el campo de gradiente cerca de la superficie. Una malla de alambre típica puede constar de alambres de acero revestidos de cobre de calibre 6 AWG, dispuestos en un patrón de cuadrícula de  $0,6\text{ m} \times 0,6\text{ m}$

(24 in × 24 in), instalados sobre la superficie de la tierra y debajo del material de la superficie, y unidos a la red de conexión a tierra principal en múltiples ubicaciones.

- Cuando sea factible, se debe utilizar de forma controlada otros medios disponibles para reducir la resistencia general de un sistema de tierra, como la conexión de cables estáticos y neutros a tierra. Es habitual utilizar objetos metálicos en el lugar que sirvan como electrodos de tierra auxiliares o como conexiones a tierra para otros sistemas. Por supuesto, las consecuencias de tales aplicaciones deben evaluarse cuidadosamente.
- Siempre que sea posible, se puede utilizar un depósito cercano de material de baja resistividad de volumen suficiente para instalar una red adicional (satélite). Esta red satélite, cuando esté suficientemente conectada a la red principal, reducirá la resistencia general y, por lo tanto, el aumento del potencial de tierra de la red de puesta a tierra. El material de baja resistividad cercano puede ser un depósito de arcilla o puede ser parte de alguna estructura grande, como la masa de hormigón de una presa hidroeléctrica.

## Consideraciones especiales.

La práctica de tener conexiones a tierra separadas dentro de un área de subestación rara vez se utiliza por las siguientes razones:

- Se producen resistencias más altas para conexiones a tierra de seguridad y de sistema independientes que las que se producirían con un único sistema de conexión a tierra uniforme.

- En caso de fallos de aislamiento en la subestación, aún podrían circular corrientes elevadas en la tierra de seguridad.
- Debido a un alto grado de acoplamiento entre electrodos separados en la misma área, no se lograría el objetivo de seguridad de mantener bajo el GPR de las conexiones a tierra de seguridad en caso de fallas en la línea.
- A menudo, podrían existir potenciales peligrosos entre puntos de conexión a tierra cercanos porque es posible el desacoplamiento de las conexiones a tierra separadas, al menos hasta cierto punto.

## **PSS®E**

Es una herramienta de software utilizada por ingenieros de sistemas de energía para simular redes de transmisión de energía eléctrica en condiciones de estado estable, así como en escalas de tiempo de unos pocos segundos a decenas de segundos. Las Subestaciones proporcionan una interconexión de circuitos de transmisión y transformación entre redes de diferentes voltajes.

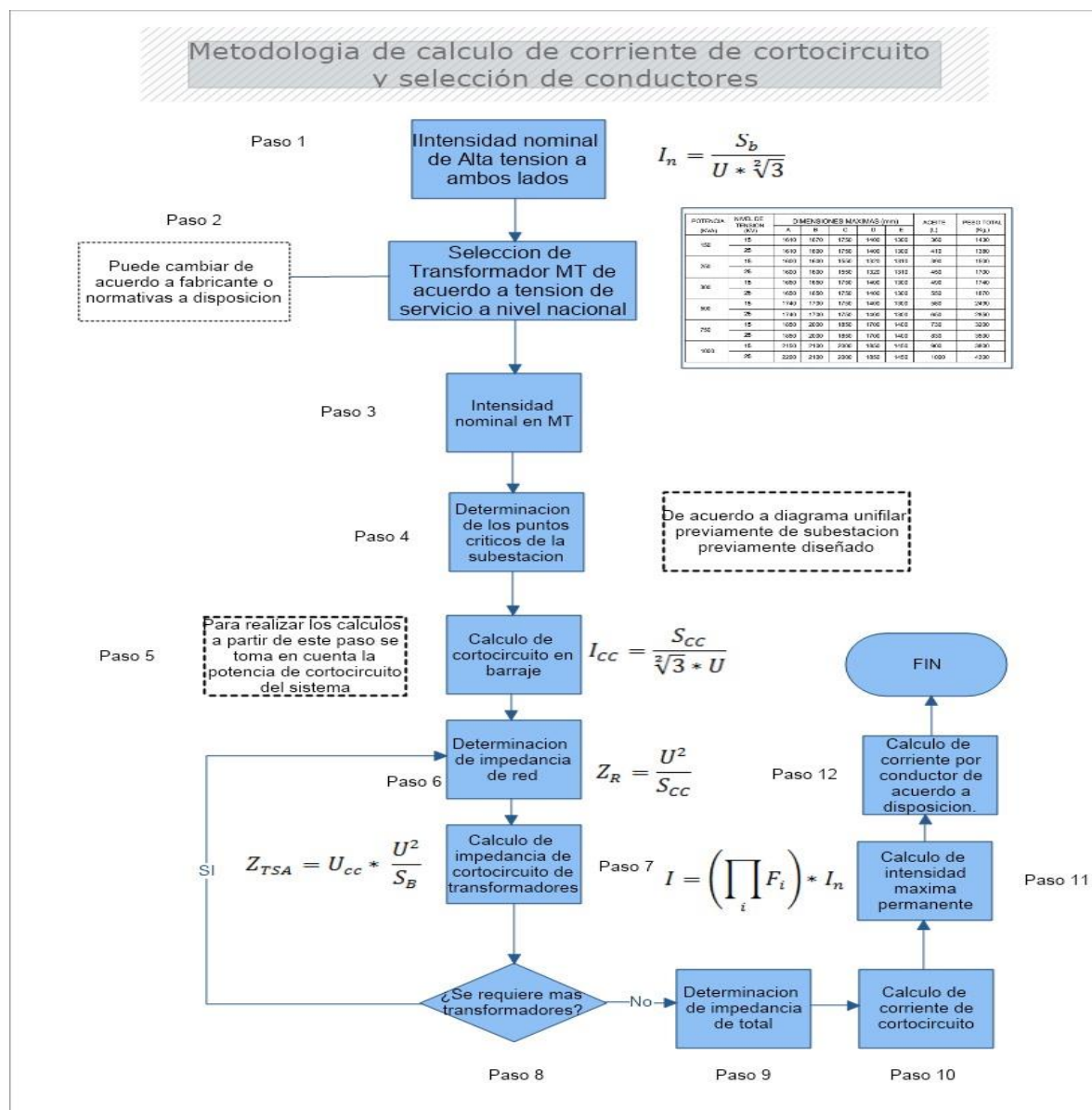
Si bien existen características básicas de este software que resultan cómodas para la simulación como lo son:

- Solución de flujo de potencia rápida y robusta para modelos de red de hasta 200.000 barras.
- Análisis de contingencias en estado estable ultrarrápido, que incluye acciones correctivas automáticas y modelado de sistemas de acciones correctivas
- Soporte completo de interruptores de nodo para modelado detallado de la topología de subestaciones.

- Análisis automático de  $P_v/Q_v$  con generación de gráficos.
- Potente automatización y personalización de programas con API Python® con todas las funciones.
- Análisis de fallas balanceadas y desbalanceadas y análisis de contingencias (deterministas y probabilísticos).
- Biblioteca completa de modelos de dinámica y flujo de potencia, que incluye tecnologías emergentes como dispositivos FACTS avanzados y turbinas eólicas.
- Construcción de modelos escritos por el usuario y basados en código.
- Potente herramienta de trazado integrada y fácil de usar.
- Construcción gráfica de modelos de controladores definidos por el usuario.
- Funcionalidades de gestión de modelos locales que permiten al usuario gestionar sin problemas los distintos archivos (caso base, modelos de red, cambios de proyecto, etc.) necesarios para crear nuevos casos.

# Metodología de cálculo de corrientes de corto circuito.

Ilustración 5. Metodología de cálculo de corriente de cortocircuito y selección de conductores



Nota: elaboración propia

Si bien resulta necesario una metodología de cálculo, se debe tener en cuenta las consideraciones de la empresa de transmisión eléctrica nacional que tienen un calibre de conductor preestablecido para ciertos proyectos lo cual es para las subestaciones el conductor 556.6 kcmil ACSR, de circuito simple.

Se describirá de manera resumida la metodología de cálculo de corriente de cortocircuito, en lo cual como se puede observar que se utiliza la formula  $I = \frac{S_b}{U \times \sqrt{3}}$  a ambos lados de la sección de alta tensión, luego se selecciona el transformador de acuerdo a la potencia anterior de la subestación AIS de la cual se hará la transición tecnológica.

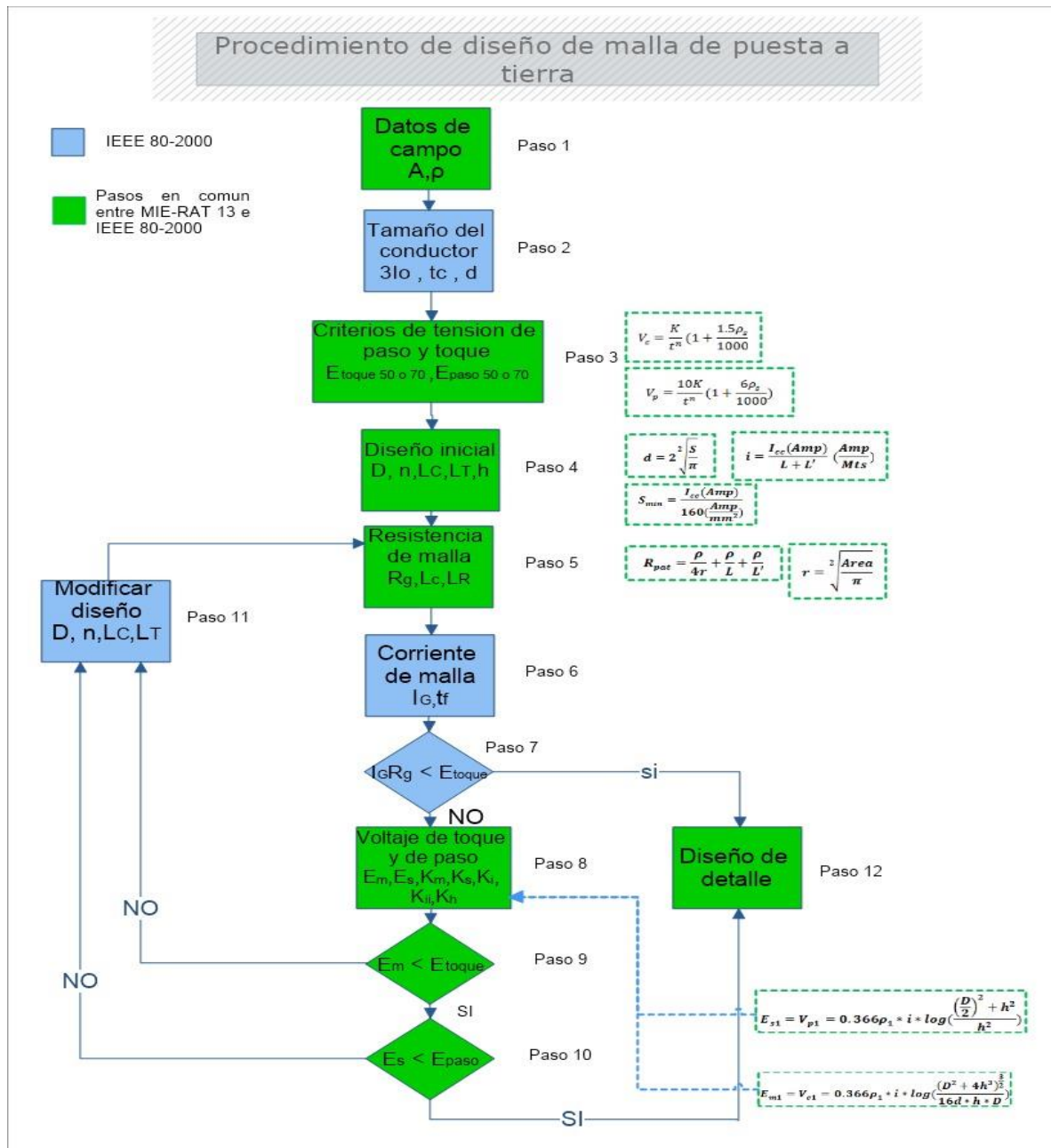
En el paso tres 3 se reutiliza la formula  $I = \frac{S_b}{U \times \sqrt{3}}$  en ambos niveles de tensión de la sección de MT. En el paso 4 se tiene que determinar las locaciones críticas de la subestación, en lo cual de acuerdo a experiencias previas se pueden determinar con rapidez. En el paso 5 se realiza el cálculo de corto circuito con la potencia de cortocircuito del sistema con el fin de simplificar los cálculos de cortocircuito en barraje a la misma fórmula del paso 1 y paso 3 de la metodología propuesta con la particularidad que se selecciona los datos correspondientes a la etapa a calcular para luego determinar en el paso 6 la impedancia de red con la formula  $Z = u^2 / S$

Luego se procede a calcular la impedancia de los transformadores de servicio auxiliar entendiendo que ya habiendo seleccionado el transformador de servicio auxiliar es necesario con los datos técnicos determinar la impedancia máxima de cortocircuito para introducirlo en los cálculos, luego se ve la necesidad en este punto de estimar si es necesario la disposición de más transformadores en una posible ampliación. Luego de haber calculado la impedancia de red e impedancia de transformadores de servicio auxiliar simplemente se suma ambas impedancias, en el paso 10 se prosigue a calcular la corriente de cortocircuito propiamente dicho con la fórmula del paso 1 y 3 con la impedancia total calculada previamente, ya con la corriente de cortocircuito es necesario multiplicar esta corriente con cierto factor de

corrección que depende de la disposición de los cables dado por la letra  $F_i$ , en la productorio mostrado en el paso 11 de la ilustración 5, para luego calcular la corriente que pasa por cada grupo de cables con el dato previamente calculado.

## Metodología de cálculo de puesta a tierra.

Ilustración 6. Metodología de cálculo de puesta a tierra.



Es imperativo tener una metodología de cálculo de red a tierra debido al reducido espacio que cubrirá en comparación con subestaciones tradicionales resulta un tanto sensible ya que las GIS no tienen la misma ventaja que las grandes extensiones de distribución física de AIS donde la red de tierra de la subestación ayuda a disipar las corrientes de falla. Por lo

tanto, para proporcionar rutas de baja impedancia a tierra para corrientes de falla, reducir las intensidades del campo magnético y minimizar las sobretensiones transitorias., ya que se tiene que llegar a una resistividad normada de  $1 \Omega$ , por motivos de practicidad en el cálculo y las distintas opciones que se deben considerar en la construcción de la misma como el uso de GEM (grounding enhancement material) o el de construir mallas satelitales o un enmallado a distintas capas o la posibilidad de construir un sistema de aterrizamiento multipunto, Consisten en conductores de puesta a tierra cortos que interconectan el GIS en numerosos puntos a lo largo de la extensión terreno a utilizar, e interconectadas con el fin de evitar anomalías en el funcionamiento de la subestaciones GIS..

El sistema de puesta a tierra para equipos GIS varía notablemente de las subestaciones aisladas en aire. Debido al valor de capacitancia relativamente alto entre el conductor central y la carcasa concéntrica de los equipos GIS, particularmente a voltajes más altos, es posible desarrollar cargas significativas en la carcasa GIS durante el proceso de conmutación, que se utiliza el sistema de aterramiento multipunto que es el normalizado por varios fabricantes de GIS para mitigar estas contrariedades.

El diseño de la red de tierras de la instalación presenta dos grados de libertad. El primero es el lado de la cuadrícula de la malla, y el segundo, el número de picas. El objetivo del cálculo es minimizar la longitud total de los conductores y picas a emplear, con vistas a obtener el diseño más económico y eficiente.

Teniendo en cuenta los criterios anteriores, se comienza un proceso iterativo, que parte de un lado de cuadrícula de malla razonable, sin considerar la existencia de picas, y se calculan las tensiones de paso y de contacto. Si se exceden las tensiones de paso y de contacto

admisibles, se introducen picas. Si esta medida es ineficaz, se comienza el proceso de nuevo, reduciendo el lado de cuadrícula de malla.

A continuación, se describe cada paso del procedimiento:

- Paso 1: El plano de la propiedad y el plano general de ubicación de la subestación deben proporcionar buenas estimaciones del área que se va a conectar a tierra. Una prueba de resistividad del suelo determinará el perfil de resistividad del suelo y el modelo de suelo necesario (es decir, modelo uniforme o de dos capas).
- Paso 2: La corriente de falla  $3I_o$  debe ser la corriente de falla futura máxima esperada que conducirá cualquier conductor en el sistema de puesta a tierra, y el tiempo,  $t_c$ , debe reflejar el tiempo de despeje máximo posible (incluido el respaldo).
- Paso 3: Se determinan los voltajes de contacto y de paso tolerables La elección del tiempo,  $t_s$ , se basa en el criterio del ingeniero de diseño.
- Paso 4: El diseño preliminar debe incluir un bucle conductor que rodee toda el área conectada a tierra, además de conductores cruzados adecuados para proporcionar un acceso conveniente a las conexiones a tierra de los equipos, etc. Las estimaciones iniciales del espaciamiento de los conductores y las ubicaciones de las varillas de tierra deben basarse en el  $I_G$  actual y el área que se va a conectar a tierra.
- Paso 5: Estimaciones de la resistencia preliminar del sistema de puesta a tierra en suelo uniforme. Para el diseño final, es posible que se deseen estimaciones

más precisas de la resistencia. El análisis informático basado en el modelado detallado de los componentes del sistema de puesta a tierra puede calcular la resistencia con un alto grado de precisión, suponiendo que se elija correctamente el modelo de suelo.

- Paso 6: Para evitar el sobrediseño del sistema de puesta a tierra, solo se debe utilizar en el diseño de la red la parte de la corriente de falla total,  $3I_o$ , que fluye a través de la red hacia la tierra remota. Sin embargo, la corriente  $I_G$  actual debe reflejar el peor tipo y ubicación de falla, el factor de decremento y cualquier expansión futura del sistema.
- Paso 7: Si el GPR del diseño preliminar está por debajo de la tensión de contacto tolerable, no es necesario realizar más análisis. Solo se requiere un conductor adicional para proporcionar acceso a las conexiones a tierra del equipo.
- Paso 8: El cálculo de los voltajes de malla y de paso para la red tal como está diseñada se puede realizar mediante las técnicas de análisis aproximado para, o mediante las técnicas de análisis computacional de suelo uniforme más precisas.
- Paso 9: Si el voltaje de malla calculado está por debajo del voltaje de contacto tolerable, el diseño puede estar completo. Si el voltaje de malla calculado es mayor que el voltaje de contacto tolerable, se debe revisar el diseño preliminar.
- Paso 10: Si tanto los voltajes de contacto como de paso calculados están por debajo de los voltajes tolerables, el diseño solo necesita los ajustes necesarios

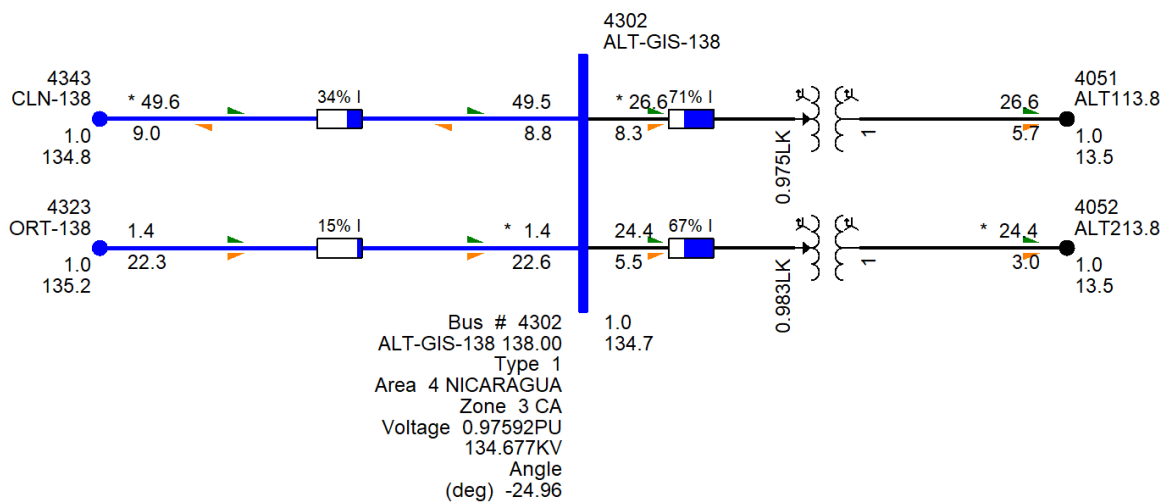
para proporcionar acceso a las conexiones a tierra del equipo. De lo contrario, se debe revisar el diseño preliminar.

- Paso 11: Si se superan los límites tolerables de paso o contacto, es necesario revisar el diseño de la red. Estas revisiones pueden incluir espaciamientos más pequeños entre conductores, varillas de tierra adicionales, etc.
- Paso 12: Después de satisfacer los requisitos de voltaje de paso y de contacto, es posible que se requieran varillas de conexión a tierra y de rejilla adicionales. Es posible que se requieran conductores de rejilla adicionales si el diseño de la rejilla no incluye conductores cerca del equipo que se va a conectar a tierra. Es posible que se requieran varillas de conexión a tierra adicionales en la base de los pararrayos, neutros de transformadores, etc. También se debe revisar el diseño final para eliminar los peligros debidos al potencial transferido y los peligros asociados con áreas especiales de preocupación.

## Simulación

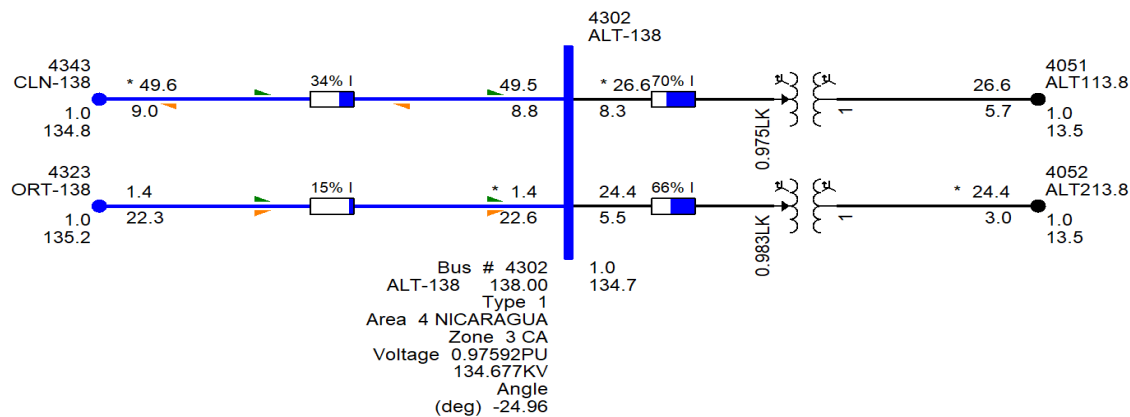
### Resultados de Simulación en PSS/E de Siemens

Ilustración 7. Escenario con proyecto año



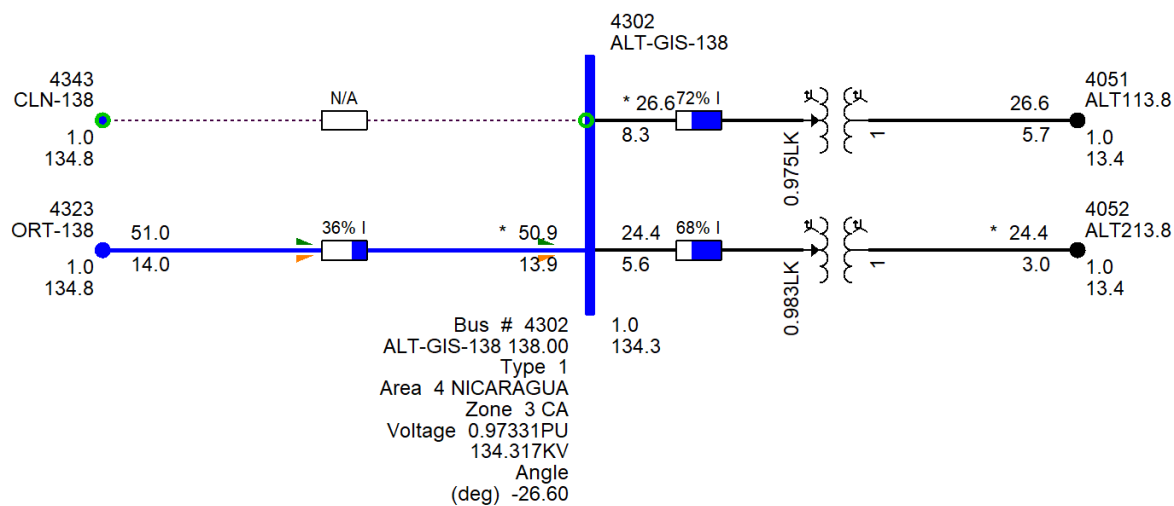
Fuente: Simulado en PSS/E

Ilustración 8. Escenario sin proyecto



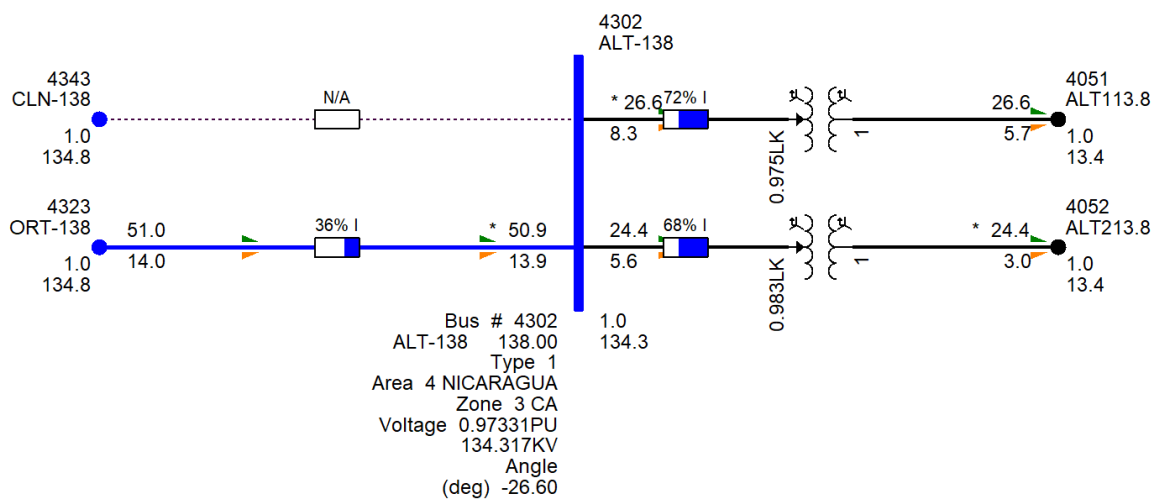
Fuente: Simulado en PSS/E

Ilustración 9. Escenario ante la contingencia de la línea de transmisión Las colinas – Altamira GIS 138 kV



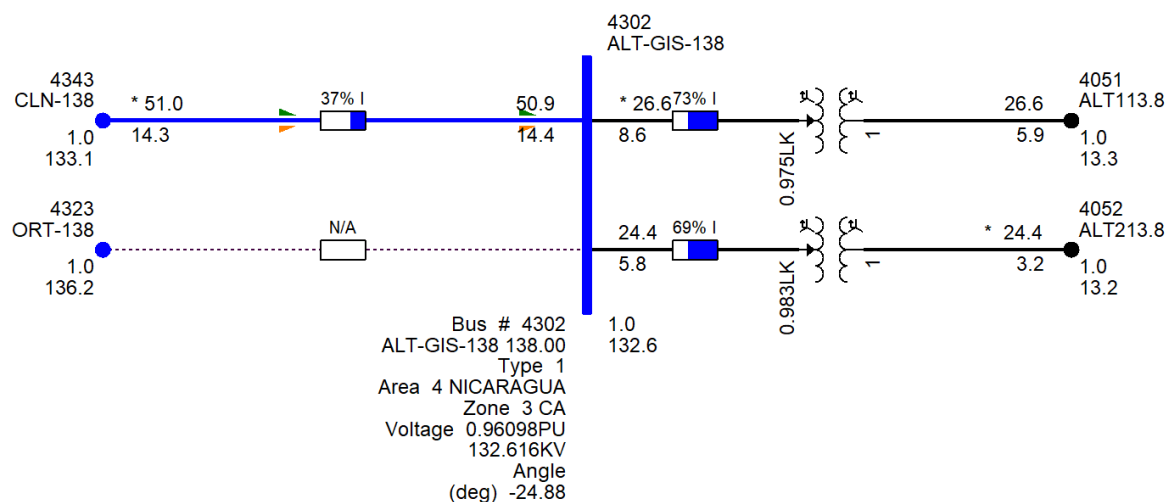
Fuente: Simulado en PSS/E

Ilustración 10. Escenario ante la contingencia de la línea de transmisión Las Colinas – Altamira AIS 138 kV



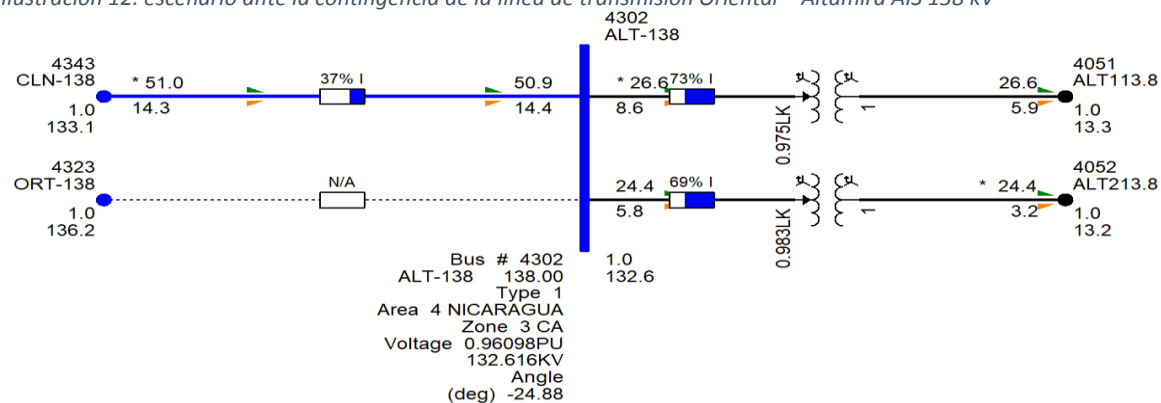
Fuente: Simulado en PSS/E

Ilustración 11. escenario ante la contingencia de la línea de transmisión Oriental – Altamira GIS 138 kV



Fuente: Simulado en PSS/E

Ilustración 12. escenario ante la contingencia de la línea de transmisión Oriental – Altamira AIS 138 kV



Fuente: Simulado en PSS/E

Se utilizó corrida de flujo de potencia con el método Full Newton Rapson del programa, obteniendo que la diferencia técnica en flujo de potencia no varía, ni obtuvimos variante negativa, En ambos escenarios (con proyecto y sin proyecto) con transformadores de 40 MVA trabajando las cargas de manera independiente debido al tipo de arreglo existente, Este tipo de arreglo viene trabajando ENATREL en diferentes subestaciones eléctricas con la diferencia que en baja tensión existen celdas de acople (13.8 kV o 24.9 kV

dependiendo la SE) para suplir de manera eficiente los circuitos de distribución así dando más confiabilidad y robustez al sistema de distribución.

ENATREL facilitó base de datos regional (Desde México hasta Panamá) para tener una simulación más acorde a la realidad, Las bases de esta simulación se sitúan en Verano Máximo del año 2024 donde el sistema de Nicaragua se encuentra limitando con Honduras en el norte y Costa Rica en el sur.

El nodo Slack se sitúa en México que es el nodo con mayor generación en el sistema (mayor potencia neta inyectada) se encarga de inyectar la potencia faltante en el conjunto (Demanda + Pérdidas) y establece el balance global del sistema.

*Ilustración 13. Nodo Slack*

|                                   |     |         |           |                                 |          |         |        |        |         |          |
|-----------------------------------|-----|---------|-----------|---------------------------------|----------|---------|--------|--------|---------|----------|
| Reached tolerance in 1 iterations |     |         |           |                                 |          |         |        |        |         |          |
| Largest mismatch:                 |     | 0.00 MW | 0.00 Mvar | 0.00 MVA at bus 27181 [15SE-115 | 115.00]  |         |        |        |         |          |
| System total absolute mismatch:   |     |         |           |                                 | 0.00 MVA |         |        |        |         |          |
|                                   |     |         |           |                                 |          |         |        |        |         |          |
| SWING BUS SUMMARY:                |     |         |           |                                 |          |         |        |        |         |          |
| BUS#                              | X-- | NAME    | --X       | BASKV                           | PGEN     | PMAX    | PMIN   | QGEN   | QMAX    | QMIN     |
| 14319                             |     | THP-400 |           | 400.00                          | 35139.8  | 36645.0 | 3664.5 | 8049.6 | 22710.5 | -18168.0 |

Fuente: facilitado por Enatrel.

Con estos resultados podemos concluir que los proyectos de las subestaciones GIS nos benefician en tecnología ante las fallas que ocurran en el sistema, esto lleva a menores tiempos de respuesta y las posibles soluciones que presenten en el futuro, En espacio para futuras ampliaciones y así suplir la proyección de la demanda en el país.

## Experiencia de servicio con subestaciones aisladas en gas.

Noruega (National Elektro Oslo)

En Noruega, el aparellaje aislado en SF<sub>6</sub> es usada cada vez más en sistemas de potencia en un intervalo de tensión de servicio de 145-420 kV. La elección del sistema depende del espacio requerido disponibilidad, economía y fiabilidad. las condiciones climáticas y la situación topográfica (central hidroeléctrica situada en la montaña) son las razones principales para el desarrollo de proyectos de subestaciones con tecnología GIS. Los factores climáticos que vuelven una opción el uso de la tecnología GIS es la contaminación por sal proveniente de costas, contaminación industrial, nieve y formación de hielo en alguna de las partes de la subestación. Poniendo en contexto técnico se resume el número de subestaciones GIS, bahías y CB's correspondientes en la ilustración 14.

*Ilustración 14. Numero de subestaciones GIS en noruega (Mayo,1985).*

| Voltage | Number   |      |                  |
|---------|----------|------|------------------|
|         | Stations | Bays | Circuit-Breakers |
| 145 kV  | 15       | 64   | 81               |
| 300 kV  | 15       | 48   | 76               |
| 420 kV  | 13       | 47   | 90               |
| TOTAL   | 43       | 159  | 247              |

Nota: extraído de "Withstand characteristic and breakdown criteria of SF<sub>6</sub> insulation" de Schei, Henriksen, Rein (1979)

El desarrollo de la tasa de fallas mayores, fallas en el circuito principal que provocan la pérdida de las funciones fundamentales del GIS, se muestra en la ilustración 15 (a).

Ilustración 15. Frecuencia de fracasos de subestaciones GIS (Mayo, 1985).

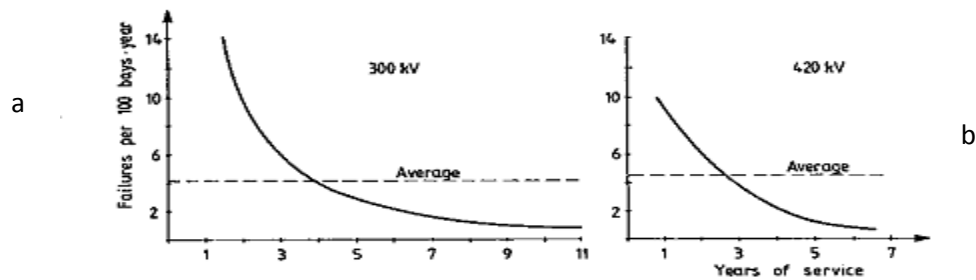


Fig. 2. Rate of failures in GIS in Norway.

Nota: extraído de “Withstand characteristic and breakdown criteria of SF<sub>6</sub> insulation” de Schei, Henriksen, Rein (1979)

La tasa de falla promedio, hasta el momento, es de alrededor de 0,15 fallas importantes por estación-año, tanto para 300 como para 420 kV. Esto corresponde a la tasa de falla dada por el grupo de trabajo 23.03 de CIGRE (Troger y colaboradores, 1982), 0.2 fallas mayores por estación-año, como se muestra en la ilustración 15 (b).

Los interruptores automáticos son exclusivamente del tipo soplador de SF<sub>6</sub> de presión única. En cuanto a los interruptores automáticos convencionales, dominan las fallas en los mecanismos de operación. Se han producido muy pocas fallas eléctricas importantes. ha sido vulnerable a daños mecánicos durante el envío. Para todos los saltos seguidos de arcos internos, el sistema de protección ha asegurado una interrupción adecuada y un daño mínimo. no se han observado fugas de gas, quemados en la carcasa ni explosiones.

### Prueba de tensión in situ, 420 kV GIS

El nivel de tensión más alto es de 420 kV. El extenso montaje in situ de GIS a este nivel de tensión requiere medidas especiales para garantizar una baja tasa de fallos. De estas medidas, es importante realizar una prueba de tensión para garantizar la calidad del aislamiento después del transporte. y montaje.

Los principales problemas que se tienen en cuenta para las pruebas de voltaje son:

- Tipo y nivel de la tensión de prueba,
- Procedimiento de prueba de aislamiento,
- Procedimiento en relación con flameos.

Como resultado del extenso montaje en el sitio, NVE requirió, un voltaje de prueba reducido con las pruebas de impulso de conmutación debido a la mayor probabilidad de descarga disruptiva. la experiencia con pruebas de voltaje de 11 GIS se da en la tabla siguiente:

*Ilustración 16. Tabla de prueba de voltaje*

**TABLE 2 Voltage Tests of 420 kV GIS**

| Test Procedures            |     |                      | Flashover                       |                        |        |
|----------------------------|-----|----------------------|---------------------------------|------------------------|--------|
| Method                     | kV  | level<br>ref. IEC517 | Conditioning<br>Particle?       | Disruptive<br>Particle | Faults |
| 50 Hz                      | 520 | 100%                 | x                               |                        | x      |
| Osc switch                 | 840 | 80%                  | x                               |                        |        |
| Osc switch                 | 840 | 80%                  | x                               |                        |        |
| AC res                     | 520 | 100%                 | x                               | x                      |        |
| AC res                     | 520 | 100%                 | x                               |                        | x      |
| Osc switch                 | 940 | 90%                  | x                               | x                      |        |
| 50 Hz                      | 520 | 100%                 | x                               |                        |        |
| AC res                     | 550 | 105%                 | x                               |                        |        |
| 50 Hz                      | 520 | 100%                 |                                 |                        | x      |
| 50 Hz                      | 520 | 100%                 | x                               |                        |        |
| 50 Hz                      | 520 | 100%                 | x*                              |                        |        |
| Osc switch                 | 940 | 90%                  | x                               |                        |        |
| "50 Hz"                    |     |                      | = Inductive testing transformer |                        |        |
| "Osc switch"               |     |                      | = Oscillating switching impulse |                        |        |
| "AC res"                   |     |                      | = AC resonant test              |                        |        |
| *Extension of existing GIS |     |                      |                                 |                        |        |

Nota: extraído de "Withstand characteristic and breakdown criteria of SF<sub>6</sub> insulation" de Schei, Henriksen, Rein (1979).

Los resultados muestran que se observan flameos de acondicionamiento en casi todas las pruebas. Las descargas disruptivas de acondicionamiento son aceptables si las propiedades de auto-regeneración del aislamiento pueden demostrarse mediante pruebas de tensión adicionales. la experiencia del servicio no ha mostrado motivos para rechazar un

procedimiento de acondicionamiento con descargas disruptivas. Se han desmontado cinco GIS para corregir fallos causados por partículas o errores de montaje. Se intuye que las pruebas de tensión son necesarias como procedimiento de acondicionamiento y para revelar la presencia de impurezas y defectos. La experiencia demuestra que deben aplicarse tensiones de prueba cercanas a la tensión soportada nominal para garantizar una baja tasa de fallos durante el servicio.

## Puesta en marcha del primer GIS comercial de 800 kV cinco años de experiencia en servicio

En noviembre de 1979, el sistema American Electric Power (AEP) puso en servicio comercial la primera subestación aislada con gas SF<sub>6</sub> de 800 kV del mundo, la joshua falls station. Esta subestación consta de una línea de entrada de 800 kV desde la estación cloverdale, que termina en una bahía aislada con gas Delle Alsthom de 800 kV, un banco de transformadores reductores de 600 MVA 800/145 kV, cinco bahías aisladas con gas Delle Alsthom de 145 kV y tres líneas de salida de 145 kV.

Durante la etapa inicial de planificación del proyecto joshua falls, se publicó la necesidad de la instalación de una subestación exterior totalmente aislada con gas SF<sub>6</sub>. Esta decisión se basó en factores ambientales, que incluyen: la ventaja de hacer propicio terrenos reducidos para el establecimiento de subestaciones GIS, un perfil vertical más bajo y la flexibilidad para optimizar los derechos de vía de salida de la línea que producen la mejor adaptación del sitio aprobado con una alteración mínima de las instalaciones del sitio natural existente.

## Experiencia operativa

La experiencia operativa ha sido favorable (consulte la ilustración 17 para conocer las operaciones totales del interruptor) con solo las siguientes interrupciones forzadas:

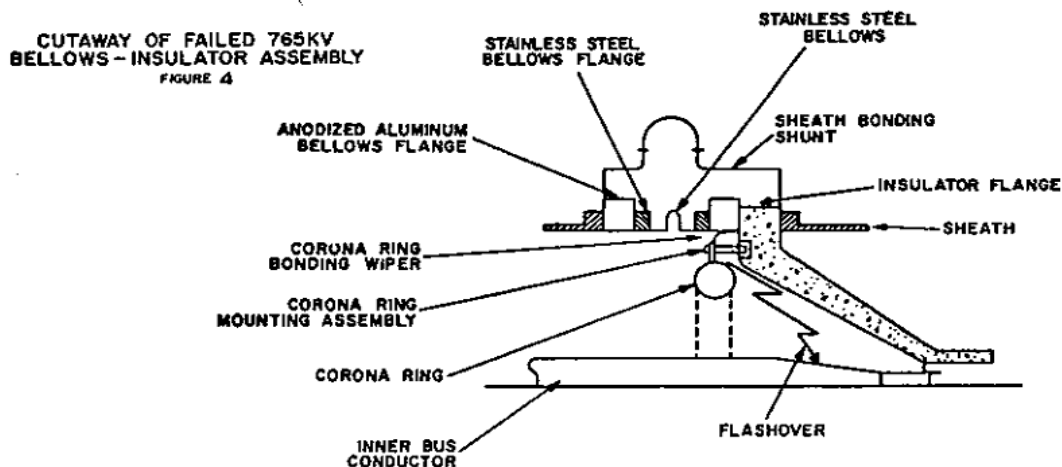
*Ilustración 17.operaciones de interruptores automáticos GIS de 800 kV, Diciembre 11,1979.*

|      | Manual Switching | Fault Clearing |
|------|------------------|----------------|
| 1979 | 28               | 1              |
| 1980 | 4                |                |
| 1981 | 7                | 1              |
| 1982 | 4                |                |
| 1983 | 2                | 1              |
| 1984 | 16               |                |
| 1985 | 1                | 1              |

Nota: extraído de “Installation and Field Testing of 138 kV SF<sub>6</sub> gas-insulated Station and Transmission Line: IEEE Transactions on power Apparatus and Systems,” Vol. PAS-94 No.5, Sep/Oct.

Después del desmontaje, se encontró evidencia de carbonización en la superficie del aislador cónico de tope de gas, en el conjunto del anillo de corona del aislador y en la unión anodizada del fuelle de expansión que se une a este aislador.

*Ilustración 18. Corte transversal del conjunto aislador de fuelle fallido de 765 kV*



Nota: extraído de “Installation and Field Testing of 138 kV SF<sub>6</sub> gas-insulated Station and Transmission Line: IEEE Transactions on power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94 No.5, Sep/Oct”.

Una inspección minuciosa de la superficie de la brida anodizada interna de un segundo fuelle en esta sección del bus reveló evidencia de carbonización entre esta brida y un conjunto de anillo anti coronas con unión deslizante. Con base en esta inspección, se planteó la hipótesis de que, como resultado de la flotación de la brida del fuelle con respecto a la tierra del revestimiento y el anillo anti corona, se había producido un arco periódico en el rasgador del anillo anti corona.

La segunda falla en servicio ocurrió mientras se agregaba gas SF<sub>6</sub> (consulte la ilustración 19, para las tasas de fuga de gas SF<sub>6</sub>). Dado que la falla ocurrió durante el llenado de gas SF<sub>6</sub> de rutina, se creía que:

- Es posible que se hayan introducido en el GIS materias extrañas como partículas conductoras libres, suciedad, etc.
- Que las partículas existentes dentro del GIS pueden haber sido alteradas, o
- Que el SF<sub>6</sub> líquido puede haber provocado la condensación de humedad en el gas o en el aislamiento cercano.

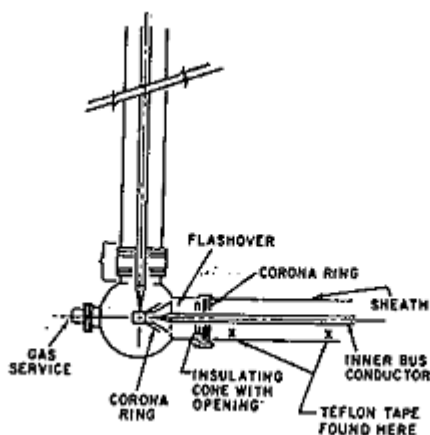
*Ilustración 19. Tasa real de fuga de gas SF<sub>6</sub>*

|             |                    |                             |
|-------------|--------------------|-----------------------------|
| <b>1980</b> | <b>6.2% (600#)</b> | <b>out of 10,619# Total</b> |
| <b>1981</b> | <b>5.2% (550#)</b> |                             |
| <b>1982</b> | <b>3.1% (330#)</b> |                             |
| <b>1983</b> | <b>4.7% (550#)</b> |                             |
| <b>1984</b> | <b>1.0% (110#)</b> |                             |
| <b>1985</b> | <b>—</b>           | <b>6,830# 800 kV</b>        |
|             |                    | <b>3,769# 138 kV</b>        |

Nota: extraído de “Installation and Field Testing of 138 kV SF<sub>6</sub> gas-insulated Station and Transmission Line: IEEE Transactions on power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94 No.5, Sep/Oct”.

La trayectoria del arco aparentaba ser del conductor a la cubierta a través de una de las cuatro aberturas en el aislador cónico también se encontró trozos de cinta de teflón, sellos de conductos y partículas de suciedad cerca del área del flameo.

*Ilustración 20. corte del conjunto de aislador fallido de 765 kV.*



Nota: extraído de “Installation and Field Testing of 138 kV SF<sub>6</sub> gas-insulated Station and Transmission Line: IEEE Transactions on power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94 No.5, Sep/Oct”.

Cuando se retira el conductor de la barra del conjunto de contactos deslizantes del aislador, Se encontró polvo fino de cobre en el protector anti corona que rodea el conjunto de contactos deslizantes y en los sujetadores del contacto montados en el conductor de la barra colectora. estos sujetadores habían cortado ranuras de 1 mm en el contacto estacionario que está montado en el aislador.

El desgaste de estos contactos podría haberse reducido muy notablemente, mediante el uso de micro lubricación.

## Experiencia operativa con GIS para 145 y 245 kV

Suiza, con una superficie de 41.200 km<sup>2</sup>, la autoridad energética de Berna ha tenido dificultades para ubicar terrenos apropiados para construir nuevas subestaciones. Como

resultado, se ha empleado la tecnología SF<sub>6</sub>. El primero de los ocho GIS se puso en funcionamiento en 1975 y se ha adquirido una experiencia apreciable. Antes de detallar esta experiencia, se comentan las principales características de las subestaciones, tales como disposición, condiciones de montaje, pruebas en sitio y mantenimiento.

### Disposición de las subestaciones

Las subestaciones para ambos niveles de tensión de 145 y 245 kV están dispuestas como instalaciones interiores. Las principales características del aparellaje de SF<sub>6</sub> se muestran en la ilustración 21. Las subestaciones se han dispuesto independiente del sistema de tensión.

*Ilustración 21. Datos de la subestación GIS.*

|                                          |                  |                  |
|------------------------------------------|------------------|------------------|
| <b>Highest voltage for equipment, kV</b> | <b>145</b>       | <b>245</b>       |
| <b>Rated current, A</b>                  | <b>1250-2500</b> | <b>1600-3150</b> |
| <b>Rated breaking current, kA</b>        | <b>40</b>        | <b>40-50</b>     |
| <b>Insulation level</b>                  |                  |                  |
| <b>rated lightning impulse</b>           |                  |                  |
| <b>withstand voltage, kV</b>             | <b>550</b>       | <b>1050</b>      |
| <b>rated power frequency short</b>       |                  |                  |
| <b>duration withstand voltage, kV</b>    | <b>230</b>       | <b>460</b>       |

Nota: extraído de “Diagnostic techniques to detect abnormal operating conditions in gas insulated substations, CIGRE, Report 23-08” de Tahiliani, V.H., K.B. Miners y W.J. Lannes (1984).

### Mantenimiento

En principio, el mantenimiento se basa en las especificaciones del fabricante. La aplicación de dispositivos de monitoreo, mencionada por Tahiliani (1984) y durante las discusiones de CIGRE en 1984, puede implicar un riesgo de perturbación. Generalmente, los gabinetes se abren con poca frecuencia porque cualquier desmantelamiento probablemente aumente el riesgo de contaminación; sin embargo, los gabinetes deben abrirse para trabajos de mantenimiento, como revisiones o reemplazo de contactos de interruptores.

El gabinete debe abrirse con sumo cuidado para garantizar la limpieza, y las comprobaciones visuales finales deben ser extremadamente precisas.

Los controles mensuales se limitan a la lectura de los manómetros. Se realiza una verificación visual externa, se determina la tasa de fuga y se verifica la composición del gas y la humedad cada dos años tomando muestras de gas para determinar la concentración de humedad y los contaminantes del gas. Los controles realizados después de la expiración de los períodos de garantía han dado resultados satisfactorios. Las tasas de fuga se mantuvieron muy por debajo del valor de garantía del 1% anual. Todas las pruebas de análisis de gases realizadas arrojaron resultados satisfactorios. Las comprobaciones aleatorias realizadas en los contactos de los interruptores automáticos demostraron su resistencia a la erosión por arco en todos los casos.

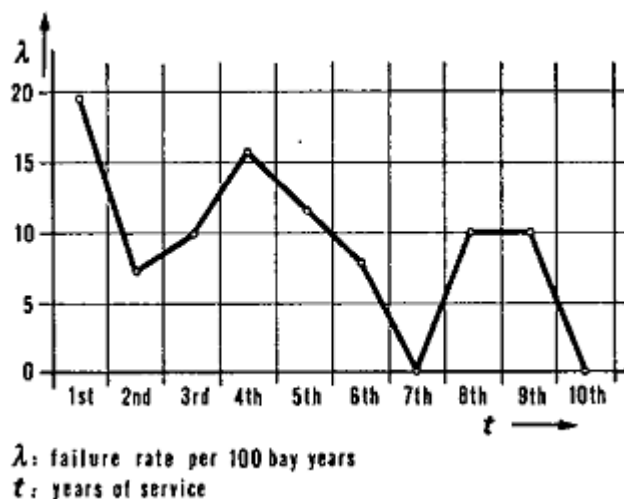
Se realizaron mejoras menores y se eliminaron pequeñas imperfecciones en las subestaciones más antiguas como resultado de los controles de garantía. En algunas situaciones, fue necesaria la reparación de monitores de densidad, válvulas de mecanismos de accionamiento de interruptores, discos de ruptura, etc. Las subestaciones instaladas recientemente no han requerido dichas reparaciones como resultado de una mayor experiencia adquirida con la tecnología GIS.

### Experiencia operacional

No se produjo fallas de arco eléctrico o cortes que hayan resultado en la interrupción del servicio. Solo se observó perturbaciones menores que podrían eliminarse fácilmente. Entre las celdas de 145 y 245 kV, no se encontró diferencia en cuanto al tipo y número de perturbaciones.

La tasa de fallos disminuye a medida que aumenta el número de años de funcionamiento, lo que suele ser el caso de los productos técnicos. Las fallas iniciales se eliminan con el transcurso del tiempo (ilustración 22).

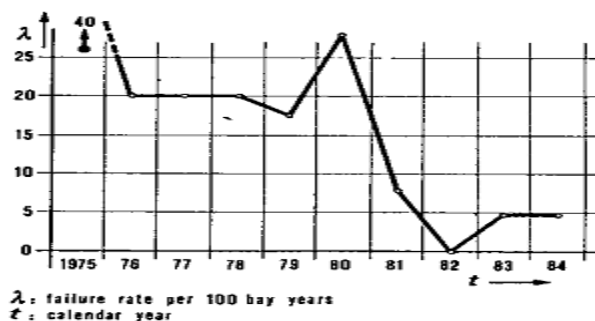
Ilustración 22. Tasa de falla dependiendo del tiempo de servicio



Nota: extraído de “Diagnostic techniques to detect abnormal operating conditions in gas insulated substations, CIGRE, Report 23-08” de Tahiliani, V.H., K.B. Miners y W.J. Lannes (1984).

Se registraron más perturbaciones en los años setenta que en los ochenta, lo que indica que la tecnología relativamente nueva de SF<sub>6</sub> ha mejorado a lo largo de los años. No se han registrado perturbaciones a la fecha con los GIS instalados en los últimos años (ilustración 23).

Ilustración 23. Tasa de fracaso por año.



Nota: extraído de “Diagnostic techniques to detect abnormal operating conditions in gas insulated substations, CIGRE, Report 23-08” de Tahiliani, V.H., K.B. Miners y W.J. Lannes (1984).

Las perturbaciones registradas pueden clasificarse en tres categorías:

- Las típicas dificultades iniciales podrían experimentarse con el ajuste de los monitores de densidad y los compresores; había falta de experiencia en el ajuste de los dispositivos de control de manera adecuada para evitar alarmas innecesarias.
- Los pequeños fallos del mecanismo de accionamiento del interruptor automático y del seccionador podrían eliminarse rápida y fácilmente.
- El sellado es de gran importancia para los sistemas que funcionan bajo presión. La mayoría de las perturbaciones registradas correspondieron a alarmas de gas; sin embargo, tales problemas no implican que no se haya dominado la tecnología de sellado. Generalmente, el sellado defectuoso podría detectarse después de un breve período de funcionamiento. Las fugas eran invariablemente pequeñas y no requerían una acción inmediata. Por esta razón, el trabajo de reparación podría planificarse en un momento conveniente tanto para el fabricante como para el personal. el personal podría realizar de inmediato operaciones menores, como reemplazar un manómetro con fugas o una junta de plomería accesorio.

### Experiencia de servicio y procedimientos de mantenimiento

Desde 1968, en la red de alta tensión de berliner kraft-und licht (BEWAG)-AG, Alemania, solo se han instalado aparellaje con carcasa metálica (GIS) aislada con SF<sub>6</sub>. El área abastecida por SCECO oeste, en jeddah,

Como resultado, BEWAG puede informar sobre la base de la experiencia operativa tanto en condiciones de Europa central como en condiciones climáticas desérticas extremas. Las bahías y componentes de SF<sub>6</sub> para 420 kV y 123 kV en ambas regiones cuentan con encapsulamiento monofásico o trifásico y se ubican en edificios. La ilustración 24 muestra

la medida en que los GIS están instalados en ambas redes. Después de describir el sistema de red, se hará referencia a aspectos significativos de la tecnología GIS desde el punto de vista de la empresa operadora.

### Estructura de red

La falta de suministros de reserva de otras redes regionales tiene un efecto significativo en la estructura y operación de las dos regiones de suministro de energía en discusión. Ambas regiones de suministro deben operarse como redes insulares por razones políticas o geográficas. Las unidades generadoras instaladas en las redes insulares se conectan mediante un sistema de red propio de 420 kV. Las grandes plantas transformadoras proporcionan la conexión a la red de 123 kV y fallas en las plantas de energía que las grandes redes. Por esta razón, es obligatoria la instalación de los componentes de red más confiables, como los equipos de conmutación.

Ilustración 24. Datos de redes de aparellaje de SF<sub>6</sub> en Berlín y Jeddah.

|                         | Number                      |        |                             |        | Remarks                           |                                            |
|-------------------------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------------|--------------------------------------------|
|                         | Berlin<br>(4 Manufacturers) |        | Jeddah<br>(3 Manufacturers) |        |                                   |                                            |
|                         | 420 kV                      | 123 kV | 420 kV                      | 123 kV |                                   |                                            |
| Substations             | 2                           | 50     | 3                           | 36     | Erection of the first Substation: |                                            |
| Bays                    | 14                          | 183    | 29                          | 305    | Berlin : 1968<br>Jeddah : 1976    |                                            |
| Bay service years (BSY) | 84                          | 1913   | 63                          | 1204   | Σ BSY : 3264                      |                                            |
| Minor Failures 1        | 11                          | 54     | 4                           | 63     | (Total number of failures)        | Failure rate                               |
|                         |                             |        |                             |        | 133                               | 0,041 $\frac{\text{failures}}{\text{BSY}}$ |
| Minor Failures 2        | —                           | 20     | 2                           | 18     | 40                                | 0,012 $\frac{\text{failures}}{\text{BSY}}$ |
| Major Failures          | —                           | 10     | 1                           | 1      | 12                                | 0,004 $\frac{\text{failures}}{\text{BSY}}$ |

Nota: extraído de “Die Verhütung der durch Elektrizität verursachten Arbeitsunfälle und Berufskeankheiten.Sicherheit für den Electrofachmann, sowie Ausbildung und Weiterbildung” de Patrunky, H. (1978).

## Características de diseño en los componentes GIS

Se discutirán los puntos principales relacionados con las características de diseño de GIS con énfasis en la confiabilidad operativa y la seguridad personal durante la conmutación y el mantenimiento. El número, la ubicación y la resistencia mecánica de los espaciadores (barreras) herméticos al gas y resistentes al arco tiene una influencia decisiva en el manejo de los sistemas de SF<sub>6</sub>. Los espaciadores de barrera están destinados a limitar el efecto de las fallas a un solo compartimento de gas, de modo que se deban aislar la menor cantidad posible de secciones de una bahía o barra colectora en caso de falla.

Para barras colectoras múltiples, la ubicación de las barreras debe garantizar que, durante el mantenimiento de una sección, las secciones restantes puedan continuar operando sin restricciones.

La capacidad de instalar adaptadores de prueba de alto voltaje en cada bahía, p. en lugar de los transformadores de voltaje inductivos, es ventajoso, ya que se evita la necesidad de potentes transformadores de prueba para las pruebas en el sitio, y se elimina la necesidad de tensar innecesariamente una gran cantidad de aisladores al localizar fallas. Para la prueba de cables, la pequeña cantidad de aisladores en el área del compartimiento de terminación del cable debe poder soportar voltaje de CC durante un período limitado. Es obligatoria una limpieza a fondo antes de realizar esta prueba. Una instalación de desconexión de la bahía restante es absolutamente necesaria.

## Instalación

La limpieza durante la instalación es crucial en términos de la posterior confiabilidad operativa de un sistema de SF<sub>6</sub>. La experiencia negativa obligó a GIS para voltajes operativos superiores a 300 kV a instalarse en las condiciones más limpias. La iluminación de los

compartimentos de gas con luz ultravioleta ha demostrado ser muy eficaz para inspeccionar la limpieza de las piezas instaladas. Las bahías de SF<sub>6</sub> con un diseño "mini"-compacto están completamente ensambladas y probadas antes de ser transportadas al sitio. En este caso, el problema de la limpieza solo se aplica en la zona del embarrado al instalar el GIS.

Durante años en BEWAG, el personal que operaba el sistema ha participado en la instalación del GIS, aprendiendo así características especiales del GIS. Esto facilitó el reajuste de los operadores de "convencionales" a GIS, haciendo menos probables los errores durante la operación de la estación.

### Puesta en marcha

En algunos casos de extensiones GIS, las circunstancias no permitieron pruebas de alto voltaje. En su lugar, se estipuló un mayor grado de limpieza en la instalación y se realizaron inspecciones muy precisas con luz ultravioleta. Después de la prueba de voltaje, la instalación de protección, la capacidad de servicio del equipo secundario, etc., se prueba de la manera habitual.

Después de ensamblar los sistemas de conmutación en gabinetes metálicos en el sitio, no se pueden inspeccionar visualmente ni los aisladores ni las partes vivas, a diferencia de un sistema de conmutación con aislamiento de aire. Por lo tanto, el examen de la fiabilidad de funcionamiento debe concentrarse en los componentes que no son visibles. Por esta razón, se desarrollaron, probaron e introdujeron procedimientos de prueba a lo largo de los años que permiten inspeccionar GIS sin abrirlos. Las siguientes inspecciones especiales y relacionadas con el SF<sub>6</sub> se realizaron de acuerdo con el llamado "método de diagnóstico":

Calidad del gas aislado: pureza (por ejemplo, porcentaje de aire), humedad y acidez.

Encapsulamiento: Prueba de fugas.

Trayectoria de corriente: medición de resistencia

Transformador de voltaje y bujes exteriores: PD (partial discharge) medición de descargas parciales.

Sistema en general: Magnitud de las sobretensiones transitorias.

Estas mediciones de diagnóstico proporcionan los llamados "valores base" después de ensamblar un sistema. Son los valores de referencia para mediciones repetidas, por ejemplo, para la localización de fallas. Es importante evitar sobretensiones transitorias altas en el encapsulado, en los cables secundarios y en las conexiones a tierra para la confiabilidad operativa de los sistemas GIS. En circunstancias desfavorables y si no se toman las medidas de protección adecuadas, las sobretensiones transitorias altas pueden provocar perturbaciones considerables, por ejemplo, en equipos de control remoto, controladores electrónicos, amplificadores de transformadores de voltaje capacitivos, etc.

### Mantenimiento

En 1968, aún no se había ganado experiencia mundial con GIS. Para asegurar la disponibilidad suficiente de los nuevos sistemas en la red de Berlín, se estipula que los componentes individuales deben funcionar durante más de 5 años sin mantenimiento. Esto dio lugar a la decisión de que se realizarían inspecciones importantes después de 5 años, a más tardar. Todos los compartimentos del sistema tendrían que estar abiertos al final de este período. En lugar de esto, el objetivo era monitorear constantemente el estado operativo de un sistema, sin abrir el sistema por medio de un monitoreo selectivo con la ayuda de mediciones.

Los primeros compartimentos se abrieron a modo de prueba después de 5 años de funcionamiento y se encontró que estaban en excelentes condiciones. Se tomó una decisión en parte sin el acuerdo de los fabricantes, pero siguiendo estrictamente el método de diagnóstico, para aumentar el intervalo de inspección al menos a 10 años.

Después de 10 años, el intervalo de inspección se incrementó a 15 años sobre la base de los resultados exitosos obtenidos por el método de diagnóstico. Actualmente, solo los equipos con más de 1000 operaciones de conmutación se abren sistemáticamente, por ejemplo, seccionadores e interruptores automáticos. Los interruptores automáticos solo se abrirán después de operaciones de cortocircuito si la carga acumulada por corrientes de cortocircuito alcanza aproximadamente 1000 kA.

La confiabilidad operativa sigue estando asegurada como resultado de la verificación periódica del sistema de aislamiento y las rutas de corriente.

### Método de diagnóstico

Esto se realiza en un ciclo de 2 años y comprende, a excepción de las sobretensiones transitorias, todas las tareas ya mencionadas para establecer los "valores base". Para cada medición se dispone de instrumentos de medición modernos y fáciles de manejar.

### Medida de pureza de SF<sub>6</sub> (porcentajes de gas extraño)

Los porcentajes de gas enrarecido siempre se miden después de que se ha completado la operación de llenado de gas, después de un cierto periodo de tiempo y/o después de un cierto número de conmutaciones de los CB's

### Humedad en el Gas aislante.

Esta medida es importante cuando los compartimentos de gas se han llenado después de la instalación. La humedad que se admite durante la instalación no puede extraerse

suficientemente en un tiempo aceptable ni siquiera mediante evacuación. Solo la circulación repetida y el secado con el equipo de mantenimiento permiten alcanzar un nivel aceptable. Los filtros estáticos pueden reducir el problema de la humedad, aunque las mediciones de humedad aún deben de realizarse periódicamente.

### Acidez del gas aislante

La posible acidez se mide utilizando indicadores especiales de probeta. La muestra de gas fluye a través de una sustancia químicamente reactiva durante un período específico y con un volumen medido. El procedimiento no requiere demasiado tiempo, proporciona valores medidos claros y registra incluso el nivel más pequeño de acidez, esto puede realizarse con un analizador de gas SF<sub>6</sub> (ilustración 25) junto con el test de pureza y humedad.

*Ilustración 25. Analizador de gas hexafluoruro de azufre.*



*Tomado de <https://www.anatrac.com/mbw-calibration/analizador-de-sf6-hexafluoruro-de-azufre/>*

### Prueba de fugas de la Encapsulación

El sistema se inspecciona con un detector de fugas. Los monitores de densidad y presión se inspeccionan al mismo tiempo. Este equipo normalmente solo registra pequeñas fugas después de mucho tiempo, pero el detector de fugas las descubre inmediatamente (ilustración 26)

Ilustración 26, Prueba de fuga de hexafluoruro de azufre.



Extraído de <https://switchgearcontent.com/wp-content/uploads/2019/09/article.4.1.jpg>

## Medición de descargas parciales.

Las descargas parciales (DP) son pequeños eventos de descarga eléctrica que ocurren en el aislamiento eléctrico.

Las mediciones de descargas parciales en transformadores de tensión inductivos y aisladores exteriores resultan ser una de las pruebas más importantes. Con la ayuda de tales mediciones, se encontró que los transformadores de voltaje, por ejemplo, producidos durante los primeros años de fabricación tenían niveles iniciales de descargas parciales en el rango de voltaje operativo. Los cambios en el comportamiento de descargas parciales se deben identificar mucho antes de que ocurran fallas graves. Las mediciones de descargas parciales en los aisladores exteriores se realizan a la tensión de funcionamiento. Los puntos de conexión de medición deben ser accesibles de forma segura. También se debe tener en cuenta la aparición de descargas parciales por partículas metálicas y componentes flotantes.

## Otras tareas de mantenimiento

Además de los controles de protección y las mediciones regulares realizadas para el método de diagnóstico, los interruptores automáticos, seccionadores y seccionadores de

puesta a tierra en particular reciben atención de mantenimiento en los intervalos recomendados por el fabricante. Después de 5 años de funcionamiento, se miden los tiempos de conmutación de los interruptores automáticos y los seccionadores. Durante la inspección semanal del aparellaje, se presta atención a los ruidos inusuales. De esta manera, se deben detectar blindajes sueltos, etc.

## Fallas

En general, el funcionamiento sin problemas se garantiza mediante los métodos de instalación más limpios posibles y la supervisión continua posterior del sistema de aislamiento mediante el método de diagnóstico. El trabajo de inspección que implica abrir el encapsulado no mejora la confiabilidad operativa.

A continuación, se muestra un relevamiento de las fallas en el GIS que se han encontrado en ambas redes durante todo el periodo de operación. Las fallas se desglosan de la siguiente manera:

Fallos menores 1: específicos del SF<sub>6</sub>, pero fuera del encapsulado, es decir, no en alta tensión (por ejemplo, tuberías, válvulas, etc.)

Fallas menores 2: dentro de la encapsulación (p. ej., cambio de transformadores de tensión, terminales de cable, blindajes sueltos, etc.). Es necesario desmontar las piezas internas. (Las fallas menores no provocan disparos de protección, pero requieren el apagado planificado de partes del GIS).

Fallas mayores: dentro del encapsulado con disparo de la protección y generalmente arruinando las partes. Eso significa desmontar y cambiar las partes arruinadas.

Fallos que no son específicos del SF<sub>6</sub>, en equipos secundarios como variadores, etc., no se consideran. Solo ocurrieron 10 fallas en Berlín en la categoría de fallas de "falla mayor" (que es la más importante para el funcionamiento de la red sin problemas). Estas fallas fueron causadas por transformadores de voltaje y/o terminales de cables defectuosos. Dos fallas importantes ocurrieron en Jeddah. Una vez más, la causa fue un transformador de voltaje inductivo defectuoso y un buje de línea aérea.

Los tubos de ensayo de acidez mencionados anteriormente se utilizan para detectar el compartimento dañado. Incluso un brillo mínimo en el sistema de alto voltaje permite una identificación definitiva. Con la ayuda de un endoscopio, se intenta descubrir la causa para poder planificar el curso posterior de las reparaciones incluso antes del desmontaje. No se produjeron fallas en la barra colectora, en los interruptores de desconexión ni en los interruptores automáticos en la red de Berlín o en Jeddah. La ilustración 27 muestra un resumen del número de fallas, las bahías instaladas y las tasas de fallas resultantes para los años de servicio.

Ilustración 27. datos de aparellaje en Berlin y Jeddah

**TABLE 1 Data of SF<sub>6</sub> Switchgear Networks in Berlin and Jeddah**

|                         | Number                      |        |                             |        | Remarks                                                             |                                            |
|-------------------------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                         | Berlin<br>(4 Manufacturers) |        | Jeddah<br>(3 Manufacturers) |        |                                                                     |                                            |
|                         | 420 kV                      | 123 kV | 420 kV                      | 123 kV |                                                                     |                                            |
| Substations             | 2                           | 50     | 3                           | 36     | Erection of the first Substation:<br>Berlin : 1968<br>Jeddah : 1976 |                                            |
| Bays                    | 14                          | 183    | 29                          | 305    |                                                                     |                                            |
| Bay service years (BSY) | 84                          | 1913   | 63                          | 1204   | Σ BSY : 3264                                                        |                                            |
| Minor Failures 1        | 11                          | 54     | 4                           | 63     | Total number of failures                                            | Failure rate                               |
|                         |                             |        |                             |        | 133                                                                 | 0,041 $\frac{\text{failures}}{\text{BSY}}$ |
| Minor Failures 2        | —                           | 20     | 2                           | 18     | 40                                                                  | 0,012 $\frac{\text{failures}}{\text{BSY}}$ |
| Major Failures          | —                           | 10     | 1                           | 1      | 12                                                                  | 0,004 $\frac{\text{failures}}{\text{BSY}}$ |

Nota: extraído de "Die Verhütung der durch Elektrizität verursachten Arbeitsunfälle und Berufskeankheiten. Sicherheit für den Electrofachmann, sowie Ausbildung und Weiterbildung" de Patrunky, H. (1978).

### Piezas de repuesto

La experiencia demuestra que la distancia entre el lugar de instalación y la fábrica del fabricante juega un papel importante en el envejecimiento de las piezas de repuesto. Después de encargar el primer GIS de BEWAG, la opinión fue que, para interruptores automáticos, interruptores de desconexión y otros componentes importantes fabricados por fabricantes fuera de Berlín, se deben mantener conjuntos completos disponibles como repuestos.

Después de algunos años de funcionamiento, solo había que mantener en stock unas pocas piezas de repuesto especiales como resultado de la baja susceptibilidad a fallas. Este método de reducción de stock de repuestos no generó problemas de disponibilidad. En caso de avería, un acuerdo con el fabricante establece que, al realizar el pedido de GIS, se dispondrá de suficientes componentes, a excepción de los armarios, para que se puedan entregar las piezas de repuesto necesarias en un plazo de dos días. Hasta la fecha, solo se han requerido transformadores de voltaje, terminales de cables y bushing exteriores. Un juego (set o equipo) de cada uno está disponible tanto en Berlín como en Jeddah. Las piezas pequeñas como juntas, contactos, etc. también se mantienen en stock para inspección y mantenimiento. Teniendo en cuenta la larga distancia para el transporte (por ejemplo, por mar), los ensamblajes para una bahía completa están disponibles en Jeddah como una "tienda de repuestos". Las reservas almacenadas de gas SF<sub>6</sub> deben ser lo suficientemente grandes como para que se rellene el compartimento más grande. Para regenerar gas SF<sub>6</sub> contaminado según la norma IEC por eliminación de aire y productos de descomposición,

### Personal.

Se recomienda encarecidamente que el GIS se instale bajo la supervisión del fabricante, Es necesario aclarar si el trabajo en el GIS debe ser realizado total o parcialmente

por el propio personal de la empresa o por el fabricante. Si la instalación real la realiza un tercero, es esencial que este posea los conocimientos básicos sobre los procedimientos de montaje del GIS y los estándares de calidad. Esto se puede lograr mediante lo siguiente:

- Antes del inicio de la instalación, el personal de instalación recibe la formación adecuada sobre los estándares de calidad aplicables a las tareas a realizar. Esta capacitación debe “actualizarse” periódicamente durante el proceso de instalación.
- Se deben dar instrucciones claras, especialmente si se utiliza un segundo idioma.
- La documentación de instalación relevante debe estar disponible.
- Se encuentran disponibles las herramientas, accesorios y ropa especial correctos y se comprende su uso adecuado.
- Todas las actividades dentro de la instalación que requieren supervisión directa están firmemente establecidas entre todas las partes.

En 1968, BEWAG pensó en subcontratar todo el trabajo al fabricante. Sin embargo, en casos como la localización de averías en cables de alta tensión, hubo que realizar un trabajo considerable en las instalaciones de gas (evacuación, llenado, secado). Como resultado, la idea de contratar personal relacionado al fabricante tuvo que cambiarse al poco tiempo. Enviar al personal de los fabricantes para este trabajo sería inadecuado por razones financieras y de tiempo. Una solución a este problema fue capacitar a un pequeño grupo de técnicos y montadores para trabajos GIS. Tanto Berlín como Jeddah tienen cuatro miembros del personal empleados en grupos de mantenimiento GIS en las empresas de suministro de energía. Siempre se contrata personal del fabricante para trabajar con el propio personal del cliente para trabajos complicados. Los operadores de conmutación también deben estar familiarizados con las características especiales del GIS para evitar operaciones incorrectas.

Se debe conocer la posición exacta de los compartimentos de gas, por ejemplo, al momento de aprobar un sitio de trabajo (Patrunky, 1978).

### Restricciones en la reparación de fallas de GIS

Este documento describe y resume la experiencia con la reparación de fallas de GIS para señalar cómo estar mejor preparado para minimizar la duración y el costo de la reparación de fallas, así como sus restricciones. Los equipos con aislamiento de gas SF<sub>6</sub> que están efectivamente aislados de la mayoría de los efectos ambientales, son inherentemente más confiables que los equipos con aislamiento de aire. La experiencia ha demostrado que las fallas ocurren tanto por causas internas como externas. Cuando ocurre una falla, la misma característica que hace que GIS sea más útil, es decir, el aislamiento de todas las partes de alto voltaje en un recinto conectado a tierra, también dificulta el acceso a la ubicación, el diagnóstico y la reparación de fallas. Este factor, sumado a la relativa novedad de los GIS e influenciado por una buena confiabilidad, crea una situación en la que muchos usuarios enfrentan grandes incertidumbres en cuanto a la preparación y respuesta adecuada a las necesidades de reparación de fallas.

Se discutirán las fallas causadas por factores internos o externos. En ambos casos, el modo de falla suele ser una pérdida de la capacidad de aislamiento que conduce a una falla de fase a tierra de miles de amperios que dura varios ciclos. Esto produce un daño importante en las partes internas y forma partículas y polvos contaminantes por lo que la capacidad aislante posterior del equipo se ve seriamente reducida.

Cuando es causado externamente, la importancia de la falla y la necesidad y el alcance de la reparación suelen ser claros. Cuando es causado internamente, la acción de reparación adecuada a menudo es incierta y, de hecho, puede ocurrir más de una falla antes de que se

pueda tomar la mejor decisión con respecto a la reparación. Estas diferentes situaciones se describirán en general, con ejemplos específicos apropiados.

### Fallas causadas internamente – Humedad

El aislamiento de gas SF<sub>6</sub> es muy sensible a la condensación de humedad en los aisladores de apoyo. Los altos niveles de humedad que pueden conducir a la condensación se evitan fácilmente mediante procedimientos de secado iniciales adecuados y la medición regular (generalmente anual) del contenido de humedad. Sin embargo, una falla causada por la humedad casi sin duda implicará un flameo de un aislador de soporte. El aislador necesitará una limpieza profunda y es posible que deba ser reemplazado.

### Fallos causados internamente – Partículas

Las partículas conductoras contaminantes de tamaño pequeño, si están libres en el gas SF<sub>6</sub> o si están en la superficie de un aislador, causan una reducción severa en la rigidez dieléctrica. Las partículas pueden quedar en la fábrica o en el campo o pueden generarse durante el funcionamiento por las piezas móviles. Una técnica estándar utilizada para minimizar el efecto de las partículas es probar el equipo en el campo después de la instalación mediante la aplicación de un voltaje de CA superior al de funcionamiento con una fuente de alimentación de baja potencia. Un tipo de fuente de alimentación resonante en serie es ideal, ya que, si se produce una avería, el circuito se desafinará inmediatamente y no fluirá ninguna corriente de seguimiento. Si una partícula causó la avería, será destruida por la chispa inicial en la mayoría de los casos. Además de la destrucción de partículas debido a la chispa, el voltaje de CA también es beneficioso porque tenderá a mover partículas a regiones de campo eléctrico más bajo del equipo. Su efecto nocivo posterior sobre la confiabilidad del equipo se

reducirá a menos que la naturaleza del movimiento sea acumular muchas partículas en un área o depositar partículas en la superficie de un aislador.

Cuando una falla es causada por partículas, existe la posibilidad de que toda partícula remanente sea destruida por el arco eléctrico. Por lo tanto, las fallas causadas por partículas generalmente no conducen a una reparación más allá de la limpieza o el reemplazo de las partes afectadas. Sin embargo, se debe prestar atención a las fallas repetidas que se explican mejor por la ruptura inducida por partículas. Como ejemplo, una instalación que involucrara un recorrido largo del barraje (que estaba en una pendiente) tuvo averías después de meses de operación en dos fases, en la sección del codo del bus en el extremo inferior de la pendiente donde el recorrido del barraje pasó de horizontal a vertical. En este caso, durante un período de tiempo, las partículas deben haberse acumulado, bajo la influencia de la gravedad, en el codo inferior e interactuar para provocar la ruptura. La reparación de la avería se realizó mediante limpieza de la zona. Se instalaron trampas de partículas en los codos para evitar averías posteriores. En este caso, la reparación de averías incluía la modificación sistemática del sistema instalado.

### Fallos causados internamente - pérdida de contacto eléctrico

Dentro del GIS hay partes metálicas que se utilizan principalmente para dar forma al campo eléctrico y no para transportar la corriente de carga. Estas partes a menudo usan pequeños contactos de resorte de baja presión para asegurar la conexión eléctrica al conductor de alto voltaje o al gabinete conectado a tierra. Dado que las piezas están hechas de aluminio y pueden recubrirse o anodizarse para mejorar las características eléctricas de la superficie, el contacto de resorte puede perder contacto eléctrico. Entonces, la pieza asume un potencial eléctrico basado en su acoplamiento capacitivo al conductor. Este potencial suele ser del

orden de decenas de kV, por lo que el pequeño espacio del resorte se rompe inmediatamente, lo que restablece el contacto eléctrico en relación con el potencial acoplado capacitivamente de alto voltaje y restaura la distribución del campo electrostático previsto. Sin embargo, la chispa no solo tiende a erosionar el resorte de contacto, pero también crea polvos aislantes (principalmente fluoruro de aluminio), partículas de metal y otra contaminación que da como resultado un mayor deterioro del contacto, más chispas y más erosión, hasta que finalmente puede ocurrir una falla.

Este tipo de defecto se detecta fácilmente mediante un sonido de "zumbido" audible externamente cuando el contacto defectuoso emite chispas 120 veces por segundo (para un sistema de 60 Hz). Una decisión razonable es esperar a que ocurra una falla antes de iniciar la reparación, ya que el daño causado por las chispas es menor. Una vez que ocurren una o más fallas, se elimina la restricción debida a la incertidumbre de las consecuencias y se deben reemplazar todos los contactos eléctricos potencialmente defectuosos.

### Defectos causados internamente - tensiones eléctricas elevadas

Los esfuerzos eléctricos altos son importantes solo cuando son excesivos dentro del aislamiento sólido de los soportes. Los ensayos de tipo exigidos por las normas, y en particular el ensayo de impulsos, han resultado muy efectivos para asegurar que los niveles de tensión eléctrica en el aislamiento de gas SF<sub>6</sub> se encuentran en los niveles adecuados. El BIL es el estrés crítico en lo que respecta a las pruebas de tipo estándar. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que el esfuerzo operativo continuo de ca es muy importante con respecto al aislamiento sólido. La mayoría de los espaciadores en los GIS de hoy en día están hechos de epoxi relleno moldeado al vacío. Este material tiene excelentes características dieléctricas y se ha utilizado con esfuerzos dieléctricos de hasta 6 kV/mm sin problemas,

siempre y cuando cada espaciador se verifique cuidadosamente mediante una prueba de descarga parcial sensible antes de su uso. Sin embargo, con esfuerzos mayores de 10 kV/mm, los espaciadores que inicialmente no muestran actividad de descarga parcial pueden fallar después de años de servicio por perforación eléctrica ("arboles"). La falla estadística de espaciadores aparentemente buenos no se comprende completamente. Para una instalación en particular, se debe tomar la decisión de reemplazar los espaciadores a medida que ocurren las fallas o en su totalidad. Obviamente, un aislador defectuoso deberá ser reemplazado.

### Defectos causados internamente - Inadecuación de la prueba de control de calidad

Todos los componentes complejos necesitan pruebas específicas de aseguramiento de la calidad para garantizar que los materiales y procesos utilizados fueron los adecuados. Algunos ejemplos son las mediciones de resistencia de los contactos enclavable y las pruebas de descarga parcial de los aisladores. Cuando ocurre una falla en GIS, los registros específicos de Garantía de Calidad del equipo involucrado en la falla pueden indicar la causa de la falla o, al considerar el conocimiento de la falla específica, llevar a la conclusión de que las medidas de Garantía de Calidad utilizadas fueron inadecuadas. Una decisión sobre el alcance de la acción de reparación subsiguiente se basa en la probabilidad de que el defecto esté presente en el equipo que aún está en servicio (sin fallas), en comparación con el costo de extender la "reparación" al equipo sin fallas. Una limitación importante debería ser la probabilidad de introducir nuevos problemas como resultado de la actividad de reparación. Por lo tanto, cuando se cree que la causa es una prueba de garantía de calidad inadecuada, el equipo se repara a medida que ocurren las fallas, a menos que se disponga de información muy específica para predecir problemas futuros.

### Fallos causados internamente: el contacto del conductor portador de corriente no está totalmente acoplado

Los contactos de los conductores enclavables que no están completamente acoplados pueden no detectarse mediante mediciones de resistencia general o mediante pruebas eléctricas. Incluso pueden conducir una corriente de carga sin un aumento excesivo de la temperatura, pero fallan en condiciones de falla. Una vez que falla un contacto enclavable, es casi seguro que ocurra una falla de fase a tierra.

### Fallos causados externamente - daños catastróficos

Aparte de los desastres naturales como inundaciones y tornados, se sabe que dos eventos externos tienen una posibilidad significativa de causar daños catastróficos a GIS. Estos son disparos e incendios. Hasta ahora, la experiencia con disparos que afectan a equipos en servicio se ha limitado a la rotura de la cubierta de porcelana de las terminaciones de SF<sub>6</sub> a aire. En este caso, las piezas de porcelana se lanzan a varios metros de la terminación y el gas SF<sub>6</sub> se escapará. Sorprendentemente, no ha habido fallas durante dos incidentes conocidos, y el equipo puede volver a funcionar reemplazando la porcelana, siempre que se lleve a cabo la limpieza y el procesamiento de gas adecuados.

Los incendios son fácilmente capaces de causar la rotura de los casquillos de porcelana y la fusión de los cerramientos de aluminio de GIS. En un caso, el incendio de un transformador fue la causa de dicho daño y hubo que reemplazar toda la terminación y las secciones de barras adyacentes.

### Fallos causados externamente - funcionamiento inadecuado

La operación incorrecta de GIS puede causar fallas de muchas maneras. Una es cerrar un interruptor de tierra en una fase energizada. Incluso un interruptor de tierra de alta

velocidad sufrirá algunos daños si los niveles de corriente de falla son altos, por lo que el procedimiento habitual es inspeccionar los contactos del interruptor después de tal operación y reemplazar las piezas según sea necesario. esta es una de las pocas situaciones de falla en las que la reparación se acomoda explícitamente como parte de la especificación de diseño habitual.

Con interruptores de tierra de baja velocidad, la operación parcial de un interruptor de desconexión o la operación del interruptor de desconexión bajo carga, el arco puede durar hasta que se interrumpa por la apertura de un interruptor automático. Si los niveles de falla son altos (por encima de 10 kA), el daño puede involucrar más que los contactos, lo que hace necesaria una limpieza exhaustiva o incluso el reemplazo completo del interruptor. La operación incorrecta se puede evitar mediante procedimientos de operación cuidadosos y el uso de enclavamientos.

#### Fallas causadas externamente: instalación o mantenimiento inapropiados en el campo

Si las herramientas de ensamblaje o prueba se dejan dentro del equipo GIS o si no se llena con gas SF<sub>6</sub>, es probable que haya una falla interna. El cuidado en la instalación y mantenimiento del equipo es una medida preventiva obvia, pero las técnicas de diseño que minimizan el uso de herramientas, simplifican el procedimiento de trabajo y extienden el tiempo entre los eventos de mantenimiento también ayudarán a prevenir este tipo de falla.

#### Fallas causadas externamente: Sobretensión

Si ocurre una sobretensión por descarga eléctrica más allá de la clasificación del equipo GIS, es probable que se produzca una falla, ya que el BIL es el límite de diseño dieléctrico básico. La falla se ubicará en el componente con el nivel de aislamiento más bajo

o donde los reflejos de la sobretensión conducen a una condición de voltaje máximo. La falla resultante causa el mismo daño que las fallas por otras causas. Ciertos modos de operación del interruptor de desconexión pueden crear sobretensiones con tiempos de subida muy cortos. También puede haber carga atrapada de CC. Si bien estos factores son preocupantes, ninguna de las fallas en la experiencia del autor fue atribuible a la operación del interruptor de desconexión.

### Resumen de la experiencia de falla

Los incidentes se identifican por número ya que un análisis detallado de la confiabilidad del GIS no es el propósito de este documento. Más bien, las fallas se tabulan para mostrar la experiencia relacionada con las descripciones anteriores.

En la tabulación, la mitad de las faltas son por causas externas. Ninguna de las fallas involucra interruptores automáticos, pocas involucran interruptores, solo una era un transformador potencial (y esto se debió a daños durante el envío). La mayoría se encuentran en tramos de barra o en terminaciones expuestas.

### Conocimiento de la falla – ubicación

Las secciones anteriores describieron fallas típicas de GIS y sus causas. Por lo general, la primera evidencia de una falla es la operación de relés e interruptores en un patrón que indica que la falla puede estar en alguna área de la estación GIS. Se puede conocer la duración y la magnitud de la falla, pero dado que las fallas en un amplio rango causan el mismo tipo de daño, la falta de conocimiento sobre la falla no es una restricción seria. Para localizar la falla con precisión, la técnica más exitosa es aplicar un voltaje de prueba de CA y escuchar las chispas resultantes. Esto generalmente se lleva a cabo antes de que se elimine el gas SF<sub>6</sub>.

Para fallas severas en compartimientos de gas relativamente pequeños, el análisis de gas puede indicar que la falla está en un compartimiento de gas en particular. Una de las técnicas de análisis más sensibles es el olfato. Sin embargo, esta técnica no se recomienda por razones de seguridad y ha sido poco fiable en varios casos.

La primera restricción de reparación es la disponibilidad de una fuente de voltaje de CA para la localización de fallas. El tipo más práctico es una fuente de alimentación resonante de serie portátil para camiones. También debe haber una forma de aplicar el voltaje al equipo GIS con un aislamiento adecuado del equipo que no debe someterse a pruebas de sobre voltajes.

## **Diagnóstico de fallas**

Una vez que se ha identificado un área de falla, se necesita acceso al interior del equipo para confirmar la ubicación y hacer un diagnóstico de la extensión del daño por falla. Si hay puertos de acceso, ventanas de visualización o elementos fáciles de quitar, como interruptores de tierra, el interior se inspecciona fácilmente. Se utilizó rayos X para determinar el estado de las partes inaccesibles sin eliminar el gas SF<sub>6</sub>. En otros casos, los agujeros cortados en el recinto son prácticos. Primero, se debe eliminar el gas SF<sub>6</sub>. La mejor práctica es usar un sistema de manejo de gas SF<sub>6</sub> con un filtro absorbente para eliminar los subproductos del arco del SF<sub>6</sub> durante la eliminación y permitir que se conserve el SF<sub>6</sub>. El compartimento debe llenarse a la presión atmosférica con aire seco. En muchos casos, la urgencia de la reparación y la falta de familiaridad del personal con el manejo y filtrado del gas conducen a que simplemente se escape el gas a la atmósfera, hasta que la presión dentro del equipo sea la presión atmosférica. La provisión de ventilación adecuada es necesaria para

el personal, para que no inhale niveles irritantes de gas contaminado por los subproductos de los arcos eléctricos al producirse una falla.

*Ilustración 28. Experiencia de fallas con GIS*

#### Causadas internamente

| INCIDENT NUMBER | CAUSE                                                           | # OF TIMES | EXTENT OF REPAIR | PREVENTION                    |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|------------|------------------|-------------------------------|
| 1               | HIGH ELECTRIC STRESS IN POST INSULATORS - PUNCTURE              | 1          | SPECIFIC         | LOWER STRESS (TRI-POST)       |
| 2               | LIGHTNING PLUS HIGH ELECTRIC STRESS IN POST INSULATORS-PUNCTURE | 1          | GENERIC          | LOWER STRESS (TRI-POST)       |
| 3               | CONDUCTOR CONTACT UNPLUGGED AT ENCLOSURE BELLOWS                | 1          | SPECIFIC         | MORE CONTACT OVERLAP          |
| 4               | HIGH ELECTRIC STRESS IN POST INSULATORS - PUNCTURE              | 1          | GENERIC          | LOWER STRESS (TRI-POST)       |
| 5               | MECHANICAL STRESS ON SUPPORT INSULATOR                          | 1          | SPECIFIC         | LIMIT MECHANICAL STRESS       |
| 6               | PARTICLE INDUCED BREAKDOWN AT LOWER ELBOW                       | 2          | GENERIC          | ADD PARTICLE TRAP             |
| 7               | LOW PRESSURE SPRING CONTACTS FAILED                             | MANY       | GENERIC          | HIGH PRESSURE SPRING CONTACTS |

#### Fallas causadas exteriormente

| INCIDENT NUMBER | CAUSE                                     | # OF TIMES | EXTENT OF REPAIR | PREVENTION          |
|-----------------|-------------------------------------------|------------|------------------|---------------------|
| 1               | GUNSHOT TO PORCELAIN BUSHING              | 1          | SPECIFIC         | --                  |
| 2               | TRANSFORMER FIRE-END SECTIONS MELTED      | 1          | SPECIFIC         | --                  |
| 3               | GUNSHOT TO PORCELAIN BUSHING              | 1          | SPECIFIC         | --                  |
| 4               | VACUUM LEFT IN GAS COMPARTMENT            | 1          | SPECIFIC         | --                  |
| 5               | VACUUM LEFT IN GAS COMPARTMENT            | 1          | SPECIFIC         | ADD MONITORING ZONE |
| 6               | SWITCH OPERATOR BINDING - PARTIAL OPENING | 2          | GENERIC          | CHANGE MATERIAL     |
| 7               | INSTALLATION TOOL LEFT IN BUS SECTION     | 1          | SPECIFIC         | --                  |

Nota: Extraído de “constraints on fault repair of GIS” de P.C. Bolin y M.D. Hopkins

La inspección visual a través de puertos u orificios de acceso del orden de 8 cm de diámetro o más grandes, con espejos pequeños y luces de mano, generalmente proporcionará información suficiente para completar un diagnóstico de la gravedad y extensión del daño por falla. La solución suele ser obvia, ya sea que la limpieza en el lugar sea práctica o que sea necesario reemplazar partes o la sección completa. Por lo general, no se requieren habilidades especiales o incluso experiencia previa para un diagnóstico de falla válido,

excepto en los casos en que se sospeche un problema genérico, entonces se debe consultar al fabricante.

### Disponibilidad de repuestos

Ahora que se ha localizado la falla y se ha diagnosticado el daño, el siguiente paso es planificar la reparación. Si solo se necesita limpieza, el plan es muy simple e implica solo el suministro de materiales de limpieza y la capacidad de evacuar el compartimiento de gas y rellenarlo con gas SF<sub>6</sub>.

Si es necesario reemplazar piezas, están disponibles en el inventario de piezas de repuesto o del fabricante de GIS. Estas piezas pueden ser elementos menores, como contactos, o en el caso de daños graves, se deben reemplazar secciones completas del equipo. Los diversos elementos necesarios para formar una sola sección de equipo no son caros de tener en stock debido a la naturaleza modular de los equipos GIS. El ensamblaje de los elementos apropiados en la sección de reemplazo requerida puede y se ha realizado con éxito en condiciones de campo. La información debe estar disponible para guiar el proceso de ensamblaje y puede proporcionarse a través de la experiencia previa con el equipo, el uso de un representante de servicio de campo del fabricante y/o libros de instrucciones y dibujos adecuados. En la mayoría de los casos, el personal de servicios públicos comprende fácilmente la construcción del equipo.

### Técnicas de reparación.

Las técnicas necesarias para la reparación son muy similares a las utilizadas para la instalación. Por lo tanto, si el personal que participó u observó la instalación está disponible, las habilidades necesarias se obtienen fácilmente. De no ser así, o para mayor eficiencia y

seguridad de las técnicas adecuadas, se puede contratar a un representante de servicio de campo del fabricante.

### Pruebas de reparación.

El enfoque conservador de las pruebas consiste en insistir en que las piezas de repuesto se prueben completamente en la fábrica (con medición de descargas parciales) y que se realicen las pruebas de aceptación originales en la pieza reemplazada de la estación GIS. Esto requiere mucho más tiempo, habilidad y equipo que simplemente reemplazar las piezas y volver a poner la estación en servicio.

Ambos enfoques se han utilizado con éxito, por lo que la decisión sobre los requisitos más importantes para las piezas y la reparación se convierte en una decisión política que se debe tomar en vista de los costos, el tiempo y la importancia de la parte reparada del gis para la confiabilidad del sistema.

### Registro de servicio de GIS reparado

Excepto en el caso de problemas genéricos donde se decide que solo se realizará un reemplazo parcial, el historial de servicio de los GIS reparados ha sido excelente. No hay efectos secundarios evidentes cuando la reparación se hace correctamente. El primer intento de reparación condujo a otra falla en solo uno de los veinte casos examinados. La reparación involucró el reemplazo de un buje de porcelana. La sección del bus vertical debajo del buje no se limpió y ocurrió una falla en el codo inferior, lo que hizo necesario reemplazar el bus y el codo.

## Experiencia y procedimientos de reparación de GIS.

Por lo general, existen dos tipos de reparaciones de GIS después de una interrupción forzada, una que involucra daños por arco eléctrico o problemas de descarga parcial que requieren el reemplazo de componentes o una reparación extensa, y la otra que involucra reparaciones menores, como la detención de fugas, que no requieren un trabajo interno extenso. En el primer caso, los procedimientos de reparación incluirían el manejo de subproductos del arco y se requieren normas y reglamentos de seguridad más estrictos. Además, normalmente se necesitan pruebas de alto potencial antes de que el equipo vuelva a estar en servicio. Para reparaciones menores, estos pasos que requieren mucho tiempo no son esenciales.

La ilustración 29 enumera los pasos que normalmente toma un equipo de reparación para reparar una falla de arco eléctrico. La duración de tiempo "ideal" y la duración de tiempo normal en la práctica se incluyen con fines comparativos. Después de una falla de arco eléctrico, la tarea inmediata es la localización de la falla, de modo que se puedan formular planes de reparación. Como resultado de la naturaleza cerrada de GIS, la ubicación de una falla interna no es inmediatamente obvia. Aunque la transmisión y otras indicaciones del sistema pueden reducir el punto de falla a una sola zona, la ubicación precisa requiere una combinación de técnicas. El análisis de gas o la indicación de polvo en las ventanas de visualización pueden aislar la falla dentro de un solo compartimiento de gas. Sin embargo, para tramos de bus largos con espaciadores abiertos, la localización de fallas puede ser un proceso lento que puede requerir la ayuda de un equipo de prueba de alto potencial. Esto puede llevar hasta dos días, para configurar el equipo y localizar físicamente la falla. Para arcos de potencia con intensidades suficientes o en compartimentos pequeños, el análisis de

gases con tubos químicos (cambio de color) puede proporcionar una indicación rápida de las ubicaciones de las fallas en cuestión de minutos (Braun y Chu, 1985).

El tiempo de desmontaje e inspección depende de la ubicación del componente defectuoso y del diseño de la subestación. El tiempo para el desmontaje y la inspección depende de la ubicación del componente defectuoso y del diseño de la subestación. Se puede gastar mucho tiempo en el desmontaje de componentes adyacentes para acceder a las secciones dañadas. Después de una falla de arco eléctrico, el gas se contaminará con subproductos del arco que deberán eliminarse y manipularse con cuidado. Los subproductos sólidos del arco que quedan dentro del compartimiento deben aspirarse. Como resultado de la naturaleza corrosiva de estos subproductos de arco, los trabajadores que los extraen deben estar equipados con ropa y aparatos adecuados.

*Tabla 2. Recomendaciones generales de mantenimiento*

| Intervalo \ Componente                      | compartimiento de gas                 | circuit breakers                                                       | seccionadores y seccionadores a tierra        | seccionadores a tierra de alta velocidad                                   |
|---------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Anual                                       | chequeo de presión                    | chequeo general                                                        |                                               |                                                                            |
| Cada 5 años                                 | chequeo de humedad y densidad del gas | comprobar el funcionamiento y sus tiempos                              | chequeo de función mecánica                   | chequeo de función mecánica                                                |
| Después de 15 a 20 años                     |                                       | chequeo y acondicionamiento de partes activas                          |                                               |                                                                            |
| Después de 2500 operaciones                 |                                       | chequeo y acondicionamiento de partes activas                          | chequeo y acondicionamiento de partes activas | chequeo y acondicionamiento de partes activas                              |
| Después de la conmutación por cortocircuito |                                       | recondicionar las piezas de contactos y boquillas después de 20,000 KA |                                               | comprobar y recondicionar los contactos después de falla por cortocircuito |

Nota: Elaboración propia

Ilustración 29. Tiempo de relación de procedimientos habituales de mantenimiento preventivo.

| Repair Procedure                                     | "Ideal"<br>Time Duration | Actual Times<br>in Practice |
|------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Fault detection - supervisory indication and alarm   | 5 min                    | 5 min                       |
| Mobilization of crew                                 | 4 hrs                    | 3-6 hrs                     |
| Fault location - gas compartment                     | 90 min                   | 2-12 hrs                    |
| Degassing                                            | 2 hrs                    | 2-8 hrs                     |
| Specific fault location - disassembly and inspection | 6-10 hrs                 | 6-48 hrs <sup>1</sup>       |
| Disassembly at location of fault                     | 12 hrs                   | 8-48 hrs                    |
| Replacement or repair of damaged components          | 6 hrs                    | 4-120 hrs <sup>2</sup>      |
| Reassembly                                           | 12 hrs                   | 17-48 hrs                   |
| Gas volume dryout                                    | 4-12 hrs                 | 4-48 hrs                    |
| Gas filling                                          | 2 hrs                    | 2-8 hrs                     |
| High potential testing and conditioning              | 10 hrs                   | 4-24 hrs <sup>3</sup>       |
| Switch into service                                  | 2 hrs                    | 7-4 hrs                     |
| Total                                                | 3 days                   | 3-16 days                   |

<sup>1</sup> If high pot test set is required, the time duration could be 24 hours or more.

<sup>2</sup> Assuming spare parts are available.

<sup>3</sup> May require additional switching for isolation.

Nota: Extraído de "Gas insulated substations Fault survey" de Chu, F.Y. y V. Tahiliani (1980).

Una estrategia y procedimientos de reparación claros son esenciales para cualquier reparación rápida. Los equipos de reparación deben estar familiarizados con las situaciones a las que se enfrentarán.

Una pieza dañada es difícil de reparar in situ. La práctica normal es reemplazar la sección dañada, si hay repuestos disponibles. En el caso de piezas gravemente dañadas que no puedan repararse, la duración de la reparación dependerá de la disponibilidad de repuestos. Los componentes críticos, como los espaciadores aislantes y los conjuntos de contactos de interruptores, pueden dañarse fácilmente durante una falla y, a menudo, tienen largos plazos de entrega para su reemplazo. Ontario Hydro ha experimentado cuatro casos de fallas relacionadas con el interruptor de desconexión, que se iniciaron en otras secciones del GIS,

como resultado de los transitorios de conmutación mientras el interruptor se cerraba. Una vez que se inició la falla, la corriente de cortocircuito que pasaba a través del arco de potencia en el interruptor causó daños extensos a los contactos del interruptor. En tales fallas, la tarea de reparación debe llevarse a cabo en dos lugares, el punto de falla inicial y el interruptor de desconexión, prolongando así la duración de la reparación.

En los compartimientos de gas con una gran cantidad de espaciadores aislantes, los subproductos de arcos sólidos y de gas generados durante la falla pueden causar daños considerables a los espaciadores. Ontario hydro ha observado la degradación de la rigidez dieléctrica de los aisladores rellenos de sílice y ha tenido que reemplazar todos los espaciadores en la cámara fallada, aunque los espaciadores no estaban cerca de la ubicación de la falla (stuckless, Braun y Chu, 1985). El daño fue causado principalmente por la exposición de la superficie del espaciador a altas concentraciones de gas derivado como subproducto de una falla por arco eléctrico y polvo sólido. Para compartimientos con una gran cantidad de espaciadores, la disponibilidad de repuestos adecuados afectaría críticamente la duración de la reparación.

Los fabricantes recomiendan varios procedimientos para aspirar y secar los compartimientos. La parte que consume más tiempo es mantener el vacío y rellenar con SF<sub>6</sub>. La eliminación de humedad con nitrógeno seco u otros gases prolongará la duración del llenado de gas.

### Estudios de casos

PP&L ha tenido dos fugas importantes y dos fallas en su GIS de 500 kV. Una fuga involucró una mirilla de vidrio (ilustración 30) agrietado que resultó en que el gas se redujera a una presión de alarma a la presión de disparo en setenta y cinco minutos. Debido a que en

ese momento la terminal de la línea GIS no era vital para las operaciones del sistema, el compartimento de gas permaneció fuera de servicio con la fuga durante el fin de semana. La reparación fue un simple procedimiento de deslizar y deslizar de una nueva ventana de visualización seguida de secado y llenado con SF<sub>6</sub>. Dado que el equipo principal no se abrió (el orificio de la ventanilla se destapó durante menos de treinta segundos), no se realizó ninguna prueba de acondicionamiento. Aunque el GIS estuvo fuera de servicio durante cuatro días, podría haber vuelto a funcionar en veinte horas.

La segunda fuga importante fue un disco de ruptura agrietado, lo que resultó en una pérdida de gas desde el nivel máximo hasta el nivel de alarma en aproximadamente veinticuatro horas. Con el cuidado adecuado, este compartimiento podría haber sido despresurizado y el disco de ruptura reemplazado con solo una interrupción del transformador de 500/230 kV y todas las líneas en servicio. Sin embargo, un error de válvula resultó en una interrupción de tres horas en dos líneas. Debido a que el GIS estuvo a presión atmosférica durante solo media hora y la humedad del gas era baja, se predijo que no era necesario ningún procedimiento de secado, por lo que el proceso de recarga tomó solo cuarenta y cinco minutos. El tiempo de corte a la sección involucrada fue de doce horas y a las terminales de línea adyacentes, de tres horas. Sin embargo, esta interrupción de tres horas resultó en casi un millón de dólares en generación fuera de los costos.

Ilustración 30. Mirillas de compartimiento de subestación GIS



A



B

*Nota: Extraído de CIGRE Brochure No. 430. SF6 Tightness Guide.*

Ocurrieron dos fallas de barra, una en un compartimiento de desconexión (no relacionada con la operación del interruptor de desconexión) y otra en un recorrido de barra. Debido a los compartimentos relativamente pequeños, la falla se localizó mediante objetivos de retransmisión y detección de subproductos de arco (análisis de gas y observación visual de polvo blanco en las ventanillas). Debido a los compartimentos relativamente pequeños, la falla se localizó mediante objetivos de retransmisión y detección de subproductos de arco (análisis de gas y observación visual de polvo blanco en las ventanillas). Fue necesario quitar las cubiertas de acceso al interruptor para ver visiblemente el espaciador defectuoso. El espaciador estaba en un lado de un interruptor de desconexión en ángulo recto. Para quitar el interruptor, fue necesario desconectar las conexiones internas que están a 90° entre sí. Después del desmontaje, el reemplazo del espaciador fue una tarea sencilla, al igual que el esmerilado del conductor del bus hasta obtener una superficie pulida y lisa. El pequeño tamaño del compartimiento de gas limitó el viaje de los subproductos de descomposición del

arco sólido. Estos polvos se limpiaron sin más desmontaje usando una aspiradora con una paleta larga de PVC y luego limpiando con paños humedecidos en solvente.

### Consideraciones económicas

El impacto de la indisponibilidad del equipo o terminal de línea depende de la ubicación de la estación, el estado del resto del sistema de energía en el momento de la indisponibilidad y los niveles de carga del sistema. Es prudente operar los sistemas de energía con márgenes de seguridad tales que la peor contingencia no resulte en una pérdida de carga inestable o una sobrecarga inmanejable del equipo. La pérdida de un interruptor de circuito, terminal de línea o bus, cada uno tiene diferentes impactos económicos en términos de generación fuera de costo requerida. Estos serán altamente específicos del sitio.

Aunque el costo de reparación puede ser de varios cientos de miles de dólares, a menudo se ve eclipsado por el gran valor de la generación fuera de los costos. Si la interrupción de la reparación pudiera programarse de tal manera que no hubiera impactos importantes en el óptimo de despacho de energía, entonces el costo de la reparación sería simplemente el costo del material y la mano de obra involucrados en el trabajo real.

### Minimizar el tiempo de inactividad.

El proceso general de instalación de un GIS puede abarcar muchos meses durante los cuales deben continuar otras actividades asociadas con el proyecto. La coordinación de actividades entre las partes responsables del proyecto es una necesidad, especialmente con respecto a la interfaz con el transformador de potencia de alto voltaje (AT) y las conexiones de cables de AT. El tiempo dedicado a estos procesos de coordinación ayudará a garantizar el número mínimo de interrupciones durante el proceso de instalación. No obstante, se producirán perturbaciones y es esencial un cierto grado de flexibilidad por parte de todas las

partes. Los procedimientos de instalación específicos se adaptan a los requisitos GIS de cada fabricante; sin embargo, una secuencia típica para la instalación de un nuevo GIS podría ser la siguiente:

- El sistema de anclaje/soporte se instala y nivela para adaptarse a las tolerancias de obra civil.
- Las bahías completas y los componentes de bahía monofásicos o trifásicos se instalan en sus respectivos soportes.
- Los elementos de conexión entre módulos están instalados y acoplados al bus.
- Se deben tener en cuenta los medios de control del polvo durante la instalación.
- El equipo GIS está conectado a tierra a una red de tierra.
- La instalación de LCC (local control cabinet) y cables de interconexión.
- El inicio del proceso de llenado al vacío con gas SF<sub>6</sub>
- Se instalan buses aislados con gas, incluidos casquillos de SF<sub>6</sub> a aire para transformadores de potencia de salida o posiciones de línea.
- Los componentes de la interfaz están instalados (por ejemplo, GIS a cable de alta tensión o transformadores de potencia), pero los enlaces de bus permanecen desacoplados.
- Se completan las pruebas de puesta en servicio del sitio, incluidas las LCC
- El GIS se somete a las pruebas de resistencia de alta tensión.
- Se instalan dispositivos GIS auxiliares (por ejemplo, transformadores de tensión y descargadores de sobretensiones) y se acoplan enlaces de bus a cables de alta tensión y/o transformadores de potencia.

Para acelerar el programa general, algunas tareas se pueden realizar en paralelo si no se compromete el estándar general de las prácticas de montaje.

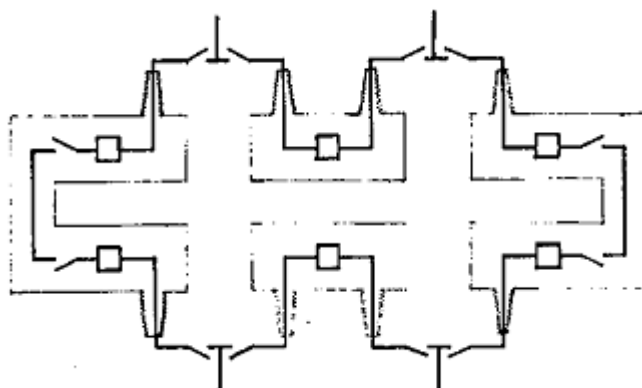
El tiempo de interrupción se puede reducir de varias maneras, incluidos los diseños innovadores de reparación rápida y los arreglos híbridos de GIS y equipos convencionales. La tarea más incierta durante la reparación es la localización de averías. EPRI y otras empresas de servicios públicos reconocieron la importancia de la localización de fallas y desarrollaron una serie de técnicas para la localización rápida de fallas en un entorno completamente cerrado (Chu, 1982; Boggs, 1983). Se dispone de técnicas térmicas, químicas y electromagnéticas, y algunas de estas técnicas descritas por Chu y Williamson (1982) y Wittle y Houston (1982) requieren poca o ninguna modificación de la barra colectora. En el caso de las técnicas químicas, la localización de fallas dentro de un solo compartimento puede llevarse a cabo muy rápidamente (Braun y Chu, 1985). A través de la implementación de algunas de estas técnicas, la localización de fallas puede reducirse a minutos en lugar de días.

La disponibilidad de repuestos es otra área que afecta la duración de la reparación. Un stock de piezas de repuesto fácilmente accesible y bien organizado es esencial para lograr un tiempo de inactividad mínimo. Los espaciadores aislantes, las juntas tóricas, los conjuntos de conectores internos y las piezas del interruptor de desconexión interno y del interruptor de tierra deben estar disponibles. Un soldador MIG y un equipo capacitado también son esenciales. Sería apropiado un inventario de piezas de repuesto por un valor equivalente al 10-15% del precio de compra del equipo del GIS.

Como puede verse, la disposición de la ilustración 31 requiere una duplicación de casquillos de SF<sub>6</sub>/aire y recorridos de línea para cada línea. La línea termina en un conjunto de desconexiones de aire "en tándem" que conducen directamente a las boquillas GIS/de aire.

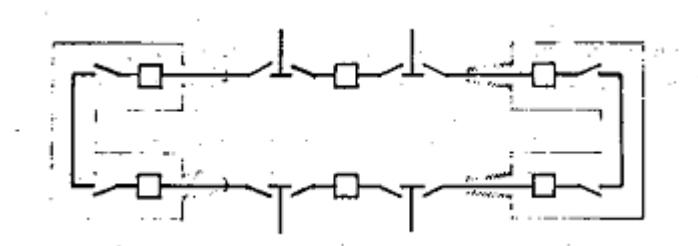
Esto permite la desconexión de la línea de la sección fallada del GIS. El disyuntor del barraje y las desconexiones son GIS estándar. Dirigiéndonos un paso más allá, la ilustración 32 muestra la misma estación, pero con la salida de línea, los seccionadores de línea y el disyuntor de enlace como componentes convencionales. Los arreglos híbridos renuncian a algo de la compactibilidad inherente a un diseño GIS puro. Este diseño ocupará quizás la mitad del área de tierra de una subestación convencional en lugar del tercio a la décima parte normalmente citado para un GIS "verdadero".

*Ilustración 31. GIS con desconexiones de línea AIS.*



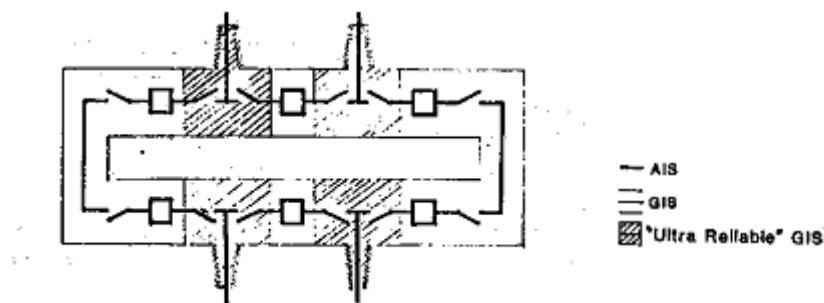
Nota: Extraído de "Gas insulated substations Fault survey" de Chu, F.Y. y V. Tahiliani (1980).

*Ilustración 32. Híbrido GIS-AIS*



Nota: Extraído de "Gas insulated substations Fault survey" de Chu, F.Y. y V. Tahiliani (1980).

Ilustración 33. GIS con secciones "ultra confiables".



Nota: Extraído de "Gas insulated substations Fault survey" de Chu, F.Y. y V. Tahliliani (1980).

Otro enfoque es utilizar un GIS "ultraconfiable" para los puntos comunes (véase la ilustración 33); por ejemplo, el equipo dimensionado para BIL de 1800 kV se puede usar para los componentes comunes de un GIS de 550 kV, el equipo BIL de 1550 kV se puede usar para las barras y los interruptores automáticos.

## Montaje electromecánico

Como conjunto mecánicamente atornillado o soldado, la instalación GIS se basa en una base rígida y nivelada. Las tolerancias del nivel de cimentación o placa base son fundamentales para el éxito del proyecto. Generalmente los fabricantes han establecido criterios específicos para la cimentación y las placas base. Las instalaciones GIS actuales pueden utilizar un canal empotrado donde inicialmente se suelda por puntos el equipo y, una vez establecida la posición final, se instala una soldadura de cordón a lo largo del pie de soporte. Otras instalaciones pueden utilizar combinaciones de perno y tuerca niveladoras. Durante la fase de diseño del proyecto, el fabricante y el propietario deben revisar los requisitos de instalación y acordar los criterios de diseño de los cimientos. Durante la construcción y la colocación de los equipos, se requerirán puntos de control inspeccionados, cuidadosos y precisos para garantizar la ubicación correcta de los equipos. Los planos del

fabricante y los pasos de montaje deben entregarse al equipo de instalación mucho antes del trabajo para permitir suficiente tiempo para la revisión y el estudio del sitio.

### Embalaje

Las cubiertas de envío no se deben quitar hasta que el equipo o el bus estén realmente listos para la conexión. Precaución: para evitar la infiltración de humedad, los componentes GIS se envían con una presión positiva de aire seco o nitrógeno. Antes de retirar completamente las cubiertas de envío, se debe aliviar la presión de envío. La limpieza interior del barraje debe mantenerse utilizando cubiertas de plástico unidas al recinto exterior con cinta adhesiva. El compartimento interior sólo debe estar abierto durante la limpieza de las bridas o durante el proceso de conexión. Si el “tiempo abierto” del barraje o del equipo se extiende, puede afectar el tiempo necesario para alcanzar un nivel de vacío aceptable. Si es necesario un tiempo abierto prolongado, el tiempo de vacío se puede reducir aumentando el tiempo establecido de llenado de nitrógeno o aire seco.

### Equipos de gran tamaño

Al mover equipos de gran tamaño o barraje, se recomienda el uso de etiquetas para controlar la carga. Si la instalación es al aire libre y hay fuertes vientos, el equipo de instalación puede optar por retrasar el trabajo debido a la gran área de "vela" y la imposibilidad de controlar el elevador. Si hay precipitaciones o alta humedad, el equipo de trabajo debe evitar abrir y exponer el interior del compartimiento a la humedad.

## Limpieza de barraje y bridas

Los materiales utilizados para limpiar la barra o las bridas no deben ser conductores y no deben desprender pelusa. Los materiales de limpieza deben eliminarse de manera

adecuada y regular en contenedores aprobados para minimizar la posibilidad de incendio. El alcohol o productos químicos similares deben almacenarse en casilleros aprobados o espacios con suficiente ventilación. Los extintores de incendios deben colocarse cerca de los disolventes de limpieza almacenados o en uso.

## Lubricantes y Selladores

En el ensamblaje solo se deben utilizar lubricantes, grasas, selladores y compuestos similares aprobados por el fabricante. El uso de otros productos químicos puede tener impactos adversos y corrosivos en los aisladores, mecanismos de enlace u otros componentes de la subestación.

## Ensamble de barra colectora o barraje.

El montaje del barraje debe ser dirigido cuidadosamente por un líder de cuadrilla. Se debe evitar el ajuste forzado del barraje u otros componentes para evitar daños al aislador o al contacto. Si bien las juntas de expansión pueden brindar cierta ayuda con la alineación de los componentes, estas juntas no están destinadas a corregir desplazamientos o desalineaciones importantes de la barra colectora. Una vez que las bridas o las secciones GIS estén aseguradas, se debe verificar que las conexiones atornilladas tengan el torque adecuado (consulte la Tabla 3). Es una buena práctica marcar las cabezas de los pernos después de la medición final del par (ilustración 34).

Ilustración 34.Cabeza del perno marcado en señal de torque comprobado.



Nota: foto adquirida de Naidu, M.S. (2004) Gas Insulated Substations, I.K. International Pvt Ltd.

Tabla 3.Aproximaciones de medidas y pares de torsion de E.E.U.U y el Sistema internacional.

| Aproximaciones de dimensiones y pares de torsión estadounidenses e internacionales. |                     |                             |                   |                 |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Medida<br>estadounidenses                                                           | Medida del<br>perno | Cabeza<br>hexagonal<br>(mm) | Torque<br>(kg.cm) | Torque<br>(N.m) | Torque<br>(lb.ft) |
|                                                                                     | M6                  | 10                          | 60                | 5.9             | 4.3               |
| 1/2 "                                                                               | M8                  | 13                          | 140               | 13.7            | 10.1              |
| 1 1/16 "                                                                            | M10                 | 17                          | 280               | 27.5            | 20.3              |
| 3/4 "                                                                               | M12                 | 19                          | 480               | 47.1            | 34.7              |
| 15/16"                                                                              | M16                 | 24                          | 1200              | 118             | 86.8              |
|                                                                                     | M20                 | 30                          | 2200              | 215             | 159               |
| 1.25 "                                                                              | M22                 | 32                          | 3000              | 294             | 217               |
|                                                                                     | M24                 | 36                          | 3900              | 382             | 282               |
|                                                                                     | M30                 | 49                          | 7700              | 755             | 557               |

## Manejo de SF<sub>6</sub>

Una vez completado el montaje del compartimento, generalmente se utiliza nitrógeno o aire seco con bajo contenido de humedad para rellenar el compartimento. El tiempo de llenado variara de acuerdo al fabricante. La experiencia de campo indica que entre 24 y 48 horas generalmente se logra una absorción óptima de la humedad. Al final del llenado, el proceso de vacío se maneja a través de remolques de procesamiento de gas disponibles comercialmente que contienen equipos de extracción de vacío, tanques de almacenamiento de gas, compresores, filtros y secadores con capacidades para la realización de vacío

(ilustración 35), existe un proceso estandarizado por la industria y regulado por la IEEE C37.1 22.3 y la IEC 6227 1-4 el cual es el mostrado en la ilustración 36. Después de un tiempo predeterminado de 1 a 2 horas de vacío, se realiza una prueba de aumento de presión, tomándose lecturas típicamente a intervalos de 10 minutos, durante un período de una hora.

Ilustración 35. Carretilla con bombona de gas para vaciado y llenado de  $\text{SF}_6$  y Manguera manifold típica para realización de vaciado



Nota: foto adquirida de Naidu, M.S. (2004) Gas Insulated Substations, I.K. International Pvt Ltd.

Ilustración 36. Proceso de tratamiento y recuperación de  $\text{SF}_6$



Nota: Reproducida de <https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/tridion/documents/SF6-ReUse Process.pdf>

Los niveles de vacío del compartimiento aumentarán inicialmente pero eventualmente deberían nivelarse para una prueba aceptable (consulte ilustración 46).

Por lo general, se introduce gas SF<sub>6</sub> nuevo en los compartimientos de gas de las nuevas subestaciones GIS. En el caso de la recuperación de SF<sub>6</sub> (es decir, la extracción de SF<sub>6</sub> del GIS), el gas SF<sub>6</sub> se transferirá desde el compartimiento de gas del GIS a la unidad de servicio de SF<sub>6</sub> (carro de recuperación de gas) u otro tanque de almacenamiento. Se debe verificar el estado del gas SF<sub>6</sub> almacenado en el carro o contenedor de almacenamiento para detectar productos de descomposición, como SO<sub>2</sub>, humedad (H<sub>2</sub>O), aire y aceite.

En el caso especial, gas usado o envejecido dentro de los compartimientos de los disyuntores, de que los contaminantes en el gas SF<sub>6</sub> superen los valores límite de contaminantes para gas usado según lo definido en la norma IEC 60480, el SF<sub>6</sub> contaminado debe enviarse al productor de SF<sub>6</sub> para su reacondicionamiento si la unidad de servicio de SF<sub>6</sub> no tiene esta capacidad. El SF<sub>6</sub> limpio se reincorpora entonces al ciclo como SF<sub>6</sub> nuevo. En los casos en que se dispone de una unidad de servicio de SF<sub>6</sub> adecuada para el manejo de SF<sub>6</sub> en el lugar, no es necesario enviar el gas al productor de SF<sub>6</sub>, sino que la unidad de servicio puede reacondicionarlo localmente. En el caso excepcional, gas que ha mitigado gran cantidad de arcos eléctricos, contenido de acidez y humedad, de que el gas SF<sub>6</sub> esté muy contaminado y no se pueda limpiar adecuadamente, el gas SF<sub>6</sub> se puede destruir quemándolo en un proceso de incineración a muy alta temperatura. El proceso de incineración lo lleva a cabo el fabricante del gas.

Las instalaciones GIS al aire libre en invierno plantean algunos desafíos particulares. La eliminación de la humedad mediante un proceso de vacío es muy difícil a temperaturas ambiente baja, por lo que es necesario tomar medidas para proporcionar calor suplementario

y recintos temporales. Estos recintos pueden estar hechos de madera y plástico y deben incluir mantas o un aislamiento similar. El manejo y procesamiento de gas en exteriores también puede requerir calentadores suplementarios. Si es posible, las botellas de gas deben almacenarse en un recinto calentado antes de su uso.

En ausencia de instrucciones del fabricante, el bus generalmente se lleva a 300  $\mu\text{m}$  y el equipo a 1000  $\mu\text{m}$ , y luego se continúa el vacío durante una hora adicional. Estos registros deben realizarse por compartimento y por fase

A medida que continúa el proceso de llenado, vacío del gas, el equipo de instalación debe etiquetar el estado de cada compartimento (consulte la ilustración 48). Estas etiquetas pueden incluir "Bajo vacío", "Presión parcial" y "Totalmente presurizado" y pueden estar codificadas por colores. La capacitación del equipo de instalación debe describir la importancia del sistema de etiquetado y el código de colores.

Se requieren herramientas especiales y plantillas de alineación para la instalación y el mantenimiento del equipo y el fabricante debe proporcionar al menos un juego.

Los siguientes materiales deben estar disponibles antes de la instalación del equipo:

- Equipos de procesamiento de gas con capacidad de almacenamiento adecuada.
- Equipos para medir niveles de humedad en  $\text{SF}_6$
- Detector de fugas de gas aislante (cuando se utilizan juntas tóricas dobles, a veces se puede conectar un manómetro a la válvula sensora para medir cualquier aumento de presión entre las juntas tóricas. Se pueden utilizar soluciones comerciales de alta viscosidad y no corrosivas para localizar fugas más grandes a un orificio de detección, en soldaduras o en bridas atornilladas)

- Aire seco, nitrógeno o desecante
- Guantes de plástico limpios y ropa de trabajo homologada.
- Paños sin pelusa y disolventes recomendados por el fabricante.
- Bolsas o cubiertas de plástico temporales para sellar las aberturas después de que se hayan retirado los componentes.
- Una aspiradora de tipo comercial con filtros de partículas de aire (HEPA) de alta eficiencia y accesorios no metálicos.
- Herramientas suministradas y recomendadas por el fabricante.
- Equipo de ventilación
- Equipos de manipulación y elevación.
- Manuales de instalación y mantenimiento y planos de instalación.
- Escaleras y plataformas
- Una tienda de campaña o refugio

El proveedor de GIS debe proporcionar los planos de instalación, los manuales de instrucciones y los datos del equipo. Esta información debe incluir, entre otras, la siguiente lista:

- Instrucciones y procedimientos secuenciados para almacenamiento, montaje, mantenimiento y desmontaje.
- Disposición general y montaje de envío.
- Requisitos de autorización de montaje y mantenimiento
- Dimensiones y pesos generales de los componentes.
- El método de elevación de componentes.
- Identificación del artículo y/o subconjunto, incluida una lista de embalaje

- Especificaciones de par o torque.
- Ajuste y preparación del equipo.
- Resistencia punto a punto para cada componente de envío ensamblado y/o sección de envío
- Procedimientos de instalación del sistema de gas, procedimientos de manipulación de gas y diagramas esquemáticos.
- Especificaciones y procedimientos de limpieza.
- Requisitos de cimentación y pernos de anclaje
- Requisitos de conexión a tierra
- Diagramas de lógica, control, flujo y cableado.
- Instrucciones y procedimientos de funcionamiento.
- Placa(s) de identificación que indican las capacidades del equipo
- Identificación de límites de expansión térmica de componentes y conjuntos.
- Una lista de repuestos recomendados.
- Una lista de componentes que pueden requerir reemplazo durante una revisión o expansión importante

## Transición tecnológica AIS a GIS en Nicaragua

Teniendo en cuenta las experiencias previas de proyecto GIS realizados en otros países y el modelo de transición escogido se podrá describir unas ciertas pautas a tener en cuenta al realizarse la transición tecnológica que facilite en gran medida la transición disminuyendo coste económico, tiempo de realización del proyecto, riesgos al personal humano en la realización del proyecto, posibles accidentes con el equipo de la subestación

GIS, de fallas eléctricas que saquen fuera de servicio alguna parte o la totalidad de la subestación, entre otros prejuicios.

Se debe construir un contenido detallado de acuerdo a los distintos escenarios como lo es, el trabajo por hacer cuando se planifica una extensión desde etapa de diseño inicial, cuando no se anticipa una ampliación y continuidad del servicio durante las obras de ampliación; con el siguiente plan general:

Información general y, más específicamente, la localización de la subestación en el sistema interconectado, proyección, diagrama del lado de alta tensión, descripción detallada de las bahías, volumen de suministro, normas y reglamentos de referencia

Especificaciones generales

Condiciones de servicio: Entorno y modalidad de trabajo

Características eléctricas en general (común a los componentes de la subestación, así como a su totalidad).

Características eléctricas en general: materiales, montajes, superficies de protección.

características específicas de carcasas metálicas: cada subestación debe tomarse en consideración y las características apropiadas para cada elemento deben ser específicas, por ejemplo

interruptores termo magnéticos

interruptores de desconexión

interruptores de desconexión a tierra

longitud de las conexiones y buses

transformadores de corriente y/o transformadores de voltaje

supresores de pico, y cualquier

cualquier interface que no se encuentre encapsulada (Bushings – conexiones en las terminales de los transformadores de potencia)

Pruebas

Generales

Tipo de prueba conforme a las normas de referencia.

Prueba individual en serie: Estos deben definirse según la norma y posiblemente basarse en un programa de control de calidad. Es deseable que cuando se trate de una inspección, realizada por el cliente o una agencia, esta inspección se realice a medida que avanza el flujo de producción.

Prueba después del montaje en el sitio: Para asegurarse de que el equipo funcione correctamente después del montaje, se debe prestar especial atención a la prueba de voltaje del circuito principal seleccionada.

Transporte: Debido al tamaño a veces voluminoso del equipo y a las configuraciones especiales del sitio, podrían ser necesarias estructuras máximas de transporte terrestre.

Herramientas de montaje y mantenimiento: Piezas de repuesto que normalmente deberían incluirse en una lista de conjuntos intercambiables, el equipo es tan complejo que la intervención interna directa (sustitución de los dedos de contacto, por ejemplo) está prácticamente excluida.

Antes de GIS, había que evaluar el costo de varias configuraciones posibles de estaciones de aparellaje convencional. Ahora, los GIS ofrecen una alternativa con características técnicas y operativas completamente diferentes que pueden tener un impacto sustancial en la evaluación económica.

Con el fin de obtener una mejor visión general, los costos se pueden agrupar convenientemente en gastos de capital, costos operativos y posibles reducciones de costos que se pueden efectuar mediante el uso de GIS.

El gasto de capital para una subestación está más o menos determinado por el estado del sitio en lo referente a obras civiles en lo cual presentaría variaciones por el tipo de suelo y obras civiles anteriores que de acuerdo a análisis de campo podría considerarse un egreso extra a la realización de un nuevo proyecto GIS, también es clave tener en consideración la característica modular de este tipo de subestación en tanto resultaría como referente el gasto de obra civil de subestación GIS Corinto de acuerdo a tabla 4 y lo que respecta a la propia subestación GIS de igual manera en la tabla 5. Las subestaciones GIS está diseñado como un sistema coherente y se entrega en el sitio con la mayor parte del ensamblaje ya completado en la fábrica. Esto simplifica la planificación y garantiza una mejor coordinación de las especificaciones técnicas y el cronograma de construcción.

*Tabla 4. Obra civil de subestación GIS Corinto*

| Obra                                                                                                  | Cantidad | Costo Unitario US\$ | Total US\$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------|------------|
| Estudios Técnicos Previos<br>(Estudio de Impacto Ambiental,<br>Estudios Topográficos y<br>Geológicos) | 1        | 114,325             | 114,325.00 |

|                                                                                                                                                 |      |                 |                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------|---------------------|
| Caseta de Control, Iluminación, Muro Perimetral y resto de Obras civiles de la SE. Incluye instalación de pivotes                               | 1    | 3609,767        | 3609,767.00         |
| Módulo de juego de barras en 138KV                                                                                                              | 1    | 174,885         | 174,885.00          |
| Módulo de Bahía de Línea 138 kV                                                                                                                 | 3    | 1229,065        | 3687,195.00         |
| Módulo de Bahía de transformación 138 kV/13.8 kV                                                                                                | 1    | 1181,979        | 1181,979.00         |
| Transformador de 20/25 MVA 138 kV/13.8 Kv                                                                                                       | 1    | 1111,639        | 1111,639.00         |
| Celdas de Distribución 13.8 kV                                                                                                                  | 8    | 96,857          | 774,856.00          |
| <b>Ingeniería y Diseño Subestaciones</b>                                                                                                        | 1    | 468,451         | 468,451.00          |
|                                                                                                                                                 |      | <b>7986,968</b> | <b>11123,097.00</b> |
| LT aérea 138kV, doble circuito, conductor 556.5 kcmil ACSR, con hilo de guarda tipo OPGW, montada en estructuras de torres de celosía y postes. | 0.5  | 400,000         | 200,000.00          |
| Ingeniería y Diseño                                                                                                                             | 1    | 7,922           | 7,922.00            |
| <b>Total Línea entre línea existente Chinandega - Planta Energetica Corinto y la nueva subestacion Corinto</b>                                  |      |                 | <b>207,922.00</b>   |
| LT soterrada 138kV, doble circuito, conductor 556.5 kcmil ACSR, con hilo de guarda tipo OPGW                                                    | 0.05 | 1931,311        | 96,565.55           |
| Ingeniería y Diseño                                                                                                                             | 1    | 6,548           | 6,548.00            |
| <b>Total Línea Soterrada entrada a Subestación GIS</b>                                                                                          |      |                 | <b>103,113.55</b>   |
| Torre para el cambio de línea aérea a Soterrada para entrada a Subestación GIS                                                                  | 1    | 100,000         | 100,000.00          |
|                                                                                                                                                 |      |                 | <b>411,035.55</b>   |

|                                                                                         |   |        |                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---|--------|---------------------|
| Circuito trifásico, doble<br>circuito, 13.8kV, 336 kcmil ACSR,<br>en postes de concreto | 4 | 60,000 | 240,000.00          |
| <b>Total Circuitos de Distribución</b>                                                  |   |        | <b>240,000.00</b>   |
|                                                                                         |   |        | <b>353,223.87</b>   |
|                                                                                         |   |        | <b>11774,132.55</b> |
|                                                                                         |   |        | <b>12127,356.42</b> |

Nota: tomada con permiso de Enatrel

Tabla 5. Gasto de realización de proyecto GIS Corinto

| Subestación                   | Obra                                                                                                                             | Cantidad | Costo<br>Unitario US\$ | Total US\$          |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------------------|---------------------|
| CORINTO                       | Estudios Técnicos<br>Previos (Estudio de<br>Impacto Ambiental,<br>Estudios Topográficos<br>y Geológicos)                         | 1        | 114,325                | 114,325.00          |
|                               | Caseta de Control,<br>Iluminación, Muro<br>Perimetral y resto de<br>Obras civiles de la<br>SE. Incluye<br>instalacion de pivotes | 1        | 3609,767               | 3609,767.00         |
|                               | Módulo de juego de<br>barras en 138KV                                                                                            | 1        | 174,885                | 174,885.00          |
|                               | Módulo de Bahía de<br>Línea 138 kV                                                                                               | 3        | 1229,065               | 3687,195.00         |
|                               | Módulo de Bahía de<br>transformación 138<br>kV/13.8 kV                                                                           | 1        | 1181,979               | 1181,979.00         |
|                               | Transformador de 20/25<br>MVA 138 kV/13.8 Kv                                                                                     | 1        | 1111,639               | 1111,639.00         |
|                               | Celdas de Distribución<br>13.8 kV                                                                                                | 8        | 96,857                 | 774,856.00          |
|                               | <b>Ingeniería y Diseño<br/>Subestaciones</b>                                                                                     | 1        | 468,451                | 468,451.00          |
| <b>SubTotal-SUBESTACIONES</b> |                                                                                                                                  |          | <b>7986,968</b>        | <b>11123,097.00</b> |

Nota: Tomado con permiso de enatrel

Los costos operativos se reducen considerablemente para GIS como resultado de costos de mantenimiento considerablemente reducidos y como resultado de costos operativos generales más bajos que resultan de una superficie de sitio muy reducida.

El peso que se dé a las ventajas resultantes del uso de los GIS variará de una aplicación a otra. Sin embargo, el GIS de diseño modular proporciona un alto grado de flexibilidad en el diseño de la subestación y el uso eficiente del espacio disponible. En ciertos casos, el diseño se puede elegir de manera que se pueda reducir el número de torres de anclaje, así como el gasto en líneas de transmisión entrantes. Los GIS también ofrecen una mayor flexibilidad en la selección del sitio. En algunas situaciones, esto brinda la posibilidad de instalar la estación más cerca de la carga, lo que reduce el gasto de capital en la red de distribución y el costo de las pérdidas de transmisión.

Dentro de la responsabilidad legal y permisos de planeación, construcción y posterior instalación de la subestación GIS que faciliten el movimiento de mano de obra en todas las etapas del proyecto incluso durante su puesta en funcionamiento estará ligado al gobierno de turno debido a los potenciales contaminantes que se vendrían a formar debido a la utilización del hexafluoruro de azufre como método principal de extinción de arcos eléctricos y cualquier falla eléctrica que eleve en gran medida la temperatura del gas confinado en las carcasa metálica de la subestación eléctrica que contendría a este, el SF<sub>6</sub> no causa un daño excesivo a la capa de ozono y al aire en la atmósfera, se debe a la naturaleza química del gas SF<sub>6</sub>. Una vez que se filtre en el aire, permanecerá durante mucho tiempo, lo que fácilmente causará el problema del efecto invernadero y exacerbará el calentamiento global. A medida que la sociedad presta cada vez más atención a la cuestión de la protección del medio ambiente verde, con el fin de desarrollar una economía verde, la mayoría de los países han formulado

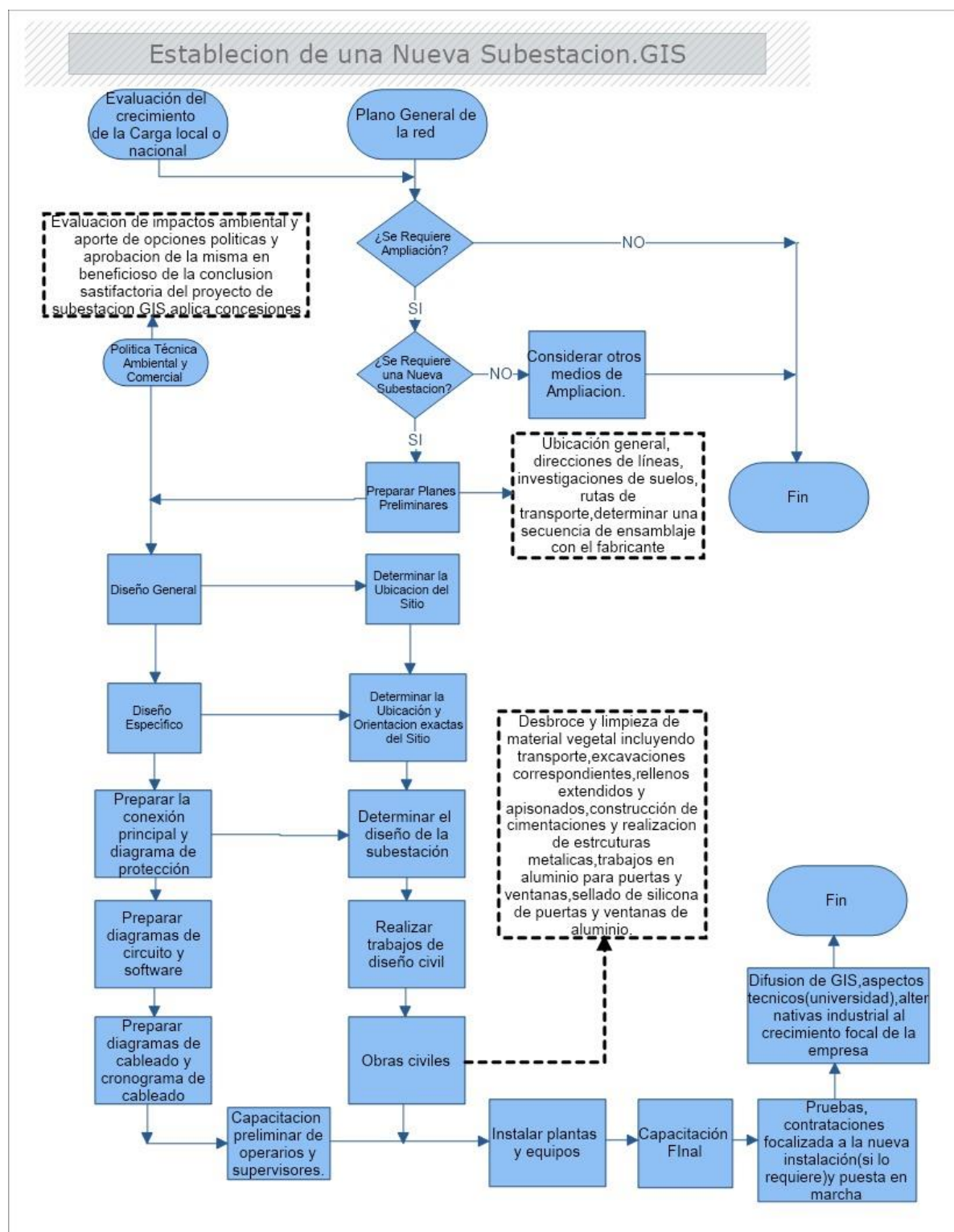
medidas de control para la seguridad del gas SF<sub>6</sub> en la producción industrial y la aplicación de equipos de energía, con el fin de reducir la probabilidad de fuga de gas SF<sub>6</sub>. Se minimiza el grado de contaminación de la atmósfera y el medio ambiente, teniendo en cuenta esto no se entrará en más detalles en la responsabilidad legal y ambiental de este tipo de proyecto en cuestión

Retomando el proceso inicial se cumplieron cada uno de los pasos de la siguiente manera; selección de la tecnología, debido a la creciente demanda eléctrica resultante del inherente crecimiento comercial en las ciudades (de acuerdo a locación ejemplo) se selección tecnología GIS empleado en subestaciones eléctricas, las negociaciones, si bien lo antes definido de este paso debido a la carencia evidentes de tecnología necesarias para hacerse de manera tal de fundar fabricas focalizadas en la manufacturación de las misma este paso se limita a la cotización y compra de la subestación GIS acorde a la necesidades de campo, la absorción o consolidación, la adaptación y la reproducción estos pasos si bien es necesario realizarlos en paralelos con el fin de crear una filosofía de “aprender-haciendo” de manera tal que se consolide los conocimiento teóricos pre-ambulares a través de la adaptación tecnológica dentro de lo posible, sin que varié los parámetros a los que debería de funcionar, al exponerlo al ambiente de la locación a instalar esto se recomienda realizarlo en cooperación con la mano de obra calificada que pueda brindar el fabricante en lo referente a la limitación tecnológica nacional actual cabría la posibilidad de adquirir conocimiento teórico y técnico más especializado de la tecnología GIS y el paso de difusión se consolidaría con noticias de construcciones de subestaciones GIS y la gran utilidad que le resulta el haberla adquirido, y el último paso de mejoras e innovaciones supone una etapa en que la

tecnología GIS ha sido dominada al punto que se demuestre con la creación de mejoras o incluso innovaciones sobre la tecnología adquirida

El algoritmo propuesto, resultante del análisis retrospectivo de proyectos realizados en el extranjero, análisis técnicos característicos de una subestación GIS y análisis de los modelos de transferencia tecnológicas realizados en otros países, referente a la inserción de la tecnología GIS como opción ante el escenario que se encuentre un espacio limitado para la construcción de una subestación es como se muestra en la ilustración 37, si bien este tipo de algoritmos está sujeto a cambios debido al inherente aspecto evolutivo del modelo triple hélice seleccionado que estará en relación con el crecimiento gradual de la experiencia de los tres entes protagonistas antes la continuación de la implementación de esta tecnología mejorando así la calidad del aprendizaje técnico eléctrico del personal de mantenimiento y así como de los proyectistas nacionales ante la implementación de este tipo de proyectos.

Ilustración 37. Establecimiento de una Nueva subestación GIS



Nota: Elaboración propia

## Conclusión

Este modelo de transferencia tecnológica de triple hélice puede emerger como herramienta que facilite de manera sistemática la introducción de la tecnología GIS en las subestaciones eléctricas en Nicaragua en donde sea requerido sin embargo se debe dejar claro que dentro de las limitaciones que puede brotar inherentemente por ciertas maneras de proceder de sus agentes (empresa privada, gobierno, universidad), para lograr el beneficio principal, que es integrar la tecnología en el menor tiempo posible, de este tipo de modelo es necesario que cada uno de estos tres órganos puedan operar sinérgicamente y en paralelo, en lo que respecta a funciones únicas que le permitan a cada órgano apoyar sin entorpecer las funciones individuales sino que permita la retro alimentación, esto con el fin de lograr en el caso de Nicaragua que carece de una ley que regule el uso y reciclaje del SF<sub>6</sub> deben de aprobarse en base a principios técnicos y no el de aprobar leyes sin ninguna utilidad informativa ni regulatoria real para poder manejar este tipo de gas sino también el de realizarse revisiones periódicas de las leyes de manejos de SF<sub>6</sub> realizando retoques, pequeñas correcciones y ajustes que no serán evidentes hasta que la ley y lo escrito en los epígrafes referentes a mantenimiento e instalación haya entrado en vigor y se halla aplicado a las condiciones del mundo real tanto en la parte técnica, educativa y humana, esto aplica también a alguna ley que pueda afectar a la universidad-industria-gobierno, evitando que la parte burocrática sea obstáculo sino que permita fluidez segura en la implementación.

El análisis técnico realizado de los proyectos previos en países extranjeros provee la información necesaria para realizar un plan de mantenimiento detallado de como operar en el caso de falla en cualquiera de sus tipos esto debido a que, a pesar de a la alta confiabilidad justificada por la puesta en marcha de esta tecnología en subestaciones en varios países

extranjeros y mejoras a estas subestaciones GIS no está excepto de la ocurrencia de fallo que saquen de servicio a la subestación, lo que incurre en una necesidad de un manual inicial de mantenimiento que debe ser retroalimentado con experiencias propias en Nicaragua.

Teniendo en cuenta lo anterior y la incorporación de metodologías de cálculos y manejo de SF<sub>6</sub> permitirá el establecimiento de subestaciones GIS en el menor tiempo posible, limitado por la calidad de la mano de obra nicaragüense, de las capacitaciones del personal logrando, junto con las políticas técnica, así una normalización, el costo y el esfuerzo necesarios para todo el proceso de establecimiento de las subestaciones GIS se reducen gracias a este tipo de propuestas, esto tomándolo a un periodo de prueba a condiciones del mundo real, que cuando lo requiera se permita hacer los ajustes necesarios, de acuerdo al terreno, capital humano, para reducir los tiempos de instalación, mantenimiento y capacitación que puedan trabajar en estas subestaciones.

## Recomendaciones

Los usuarios de GIS deben prepararse para la reparación de fallas capacitando al personal para comprender el ensamble de la subestación GIS y tener a mano el equipo (manejo de gas y prueba eléctrica) y las piezas de repuesto (contactos, aisladores, bujes de porcelana) que probablemente se dañen por una falla. Algunos de los elementos que deben considerarse son los siguientes:

- Desarrollo de zonas de gas y requisitos de disposición de monitoreo y diagramas esquemáticos de gas.
- Desarrollo de un diagrama unifilar requerido para la estación
- Desarrollo de los arreglos generales requeridos
- Determinación del alcance y la intención de las responsabilidades del fabricante,
- Determinación del trabajo de preparación del sitio que será necesario un cronograma de realización
- identificar cualquier consideración ambiental especial Planificando la instalación
- Prueba de fugas
- Pruebas mecánicas u operativas.
- Pruebas dieléctricas de circuitos primarios con pasos de acondicionamiento.
- Pruebas (puesta en servicio) entre equipos GIS y balance de planta para integración de sistemas
- Preparar un cronograma para las cuadrillas de trabajo para prever un uso más económico de la mano de obra.
- Se debe observar en todo momento la limpieza, de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

## Web grafía

- ANATRAC. (s.f.). *Anatrac.com*. Obtenido de <https://www.anatrac.com/mbw-calibration/analizador-de-sf6-hexafloruro-de-azufre/>
- Csanyl, E. (1 de Noviembre de 2024). *Electrical Engineering Portal*. Obtenido de <https://electrical-engineering-portal.com/choosing-ais-gis-substation-design-factors>
- España, P. (s.f.). <https://prtr-es.es/>. Obtenido de <https://prtr-es.es/SF6-Hexafluoruro-de-azufre,15597,11,2007.html>
- Mauricio Montoya, G. L. (14 de octubre de 2015). *Revista Espacios*. Obtenido de <https://www.revistaespacios.com/a15v36n24/15362422.html>
- Reveco, R. (06 de junio de 2018). <https://www.bloginstrumentacion.com/>. Obtenido de <https://www.bloginstrumentacion.com/knowhow/que-es-el-hexafloruro-de-azufre-o-sf6/>
- Sectorelectricidad. (20 de agosto de 2017). <https://www.sectorelectricidad.com/>. Obtenido de <https://www.sectorelectricidad.com/18025/gis-vs-ais-subestacion-de-puesta-a-tierra/>
- SIEMENS. (s.f.). *Siemens.com*. Obtenido de <https://www.siemens.com/co/es/compania/acerca-de-nosotros/nuestros-negocios-/smart-infrastructure/automatizacion-energetica-y-red-inteligente/pss/pss-e.html>
- Solvay. (06 de Septiembre de 2013). *Solvay*. Obtenido de <https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend616/files/tridion/documents/SF6-ReUse-Process.pdf>
- Summa, R. (20 de Septiembre de 2019). <https://revistasumma.com/>. Obtenido de <https://revistasumma.com/costa-rica-subestacion-electrica-de-apm-terminals-entra-en-operacion/>
- Vega, R. (14 de septiembre de 2020). *bloginstrumentacion.com*. Obtenido de <https://www.bloginstrumentacion.com/productos/sf6/peligros-comunes-del-gas-sf6-y-como-evitarlos/#:~:text=Riesgo%20para%20la%20salud,desplazar%20de%20all%C3%AD%20el%20ox%C3%ADgeno.>
- webaero.net*. (s.f.). Obtenido de [https://www.webaero.net/ingenieria/especificaciones\\_y\\_normas/NB/reglamentos\\_tecnicos\\_oficiales/mierat/mierat13.pdf](https://www.webaero.net/ingenieria/especificaciones_y_normas/NB/reglamentos_tecnicos_oficiales/mierat/mierat13.pdf)

## Bibliografía

- CHACÓN, W. E. (2018). *DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN TÉCNICA Y AMBIENTAL DE LA AMPLIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN DE TRANSFORMACIÓN INCIENSO -GIS- 230/69 KV DE 300 MVA EN CONFIGURACIÓN INTERRUPTOR Y MEDIO MÁS DOBLE BARRA*. GUATEMALA: UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.
- ESCALADA, I. J. (2002). *SUBESTACIONES ELECTRICAS DE ALTA TENSION AISLADAS EN GAS*. Argentina: Apuntes del autor.
- F.Y. Chu, V. t. (1980). *Gas insulated substations Fault survey*. IEEE.
- GIS Substation Design and Execution HV and EHV GIS application and design considerations*. (2014). United States of America: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Harper, G. H. (2002). *Elementos de diseño de Subestaciones Electricas*. Mexico D.F.: Limusa.
- K.B., W. L. (1984). *Diagnostic techniques to detect abnormal operating conditions in gas insulated substations, CIGRE, Report 23-08*. CIGRE.
- Koch, E. b. (2014). *GAS INSULATED SUBSTATIONS*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom: IEEE PRESS and John Wiley & Sons Ltd.
- Martin, J. R. (1987). *Diseño de Subestaciones Electricas*. Mexico D.F.: McGraw-hill.
- Matulic, G. R. (1975). Installation and Field Testing of 138 kV SF6 gas-insulated Station and Transmission Line. *IEEE Transactions on power Apparatus and Systems*, 1589-1598.
- Patrunky, H. (1978). *Die Verhutung der durch Elektrizitat verursachten Arbeitsunfalle und Berufskeankheiten.Sicherheit fur den Electrofachmann, sowie Ausbildung und Weiterbildung*.
- Rodriguez, J. M. (2010). *Sistema de puesta a tierra:Diseñado con IEEE 80 y evaluado con MEF*. Manizal,Colombia: Blanecolor Ltda.
- Schei, R. H. (1979). Withstand characteristic and breakdown criteria of SF6 insulation. *Third international symposium on high voltage engineering*. Milan.
- Substations Committee of the IEEE Power Engineering Society. (2000). *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. United States of America.: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

## Anexos

Ilustración 38. Datos generales de Subestación Altamira

| Subestación Altamira |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Entrada en operación | 1980                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Capacidad instalada  | 80 MVA.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Transformador 1      | 40 MVA, 138/13.8 KV.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Transformador 2      | 40 MVA, 138/13.8 kV.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Conexión             | Subestaciones Oriental y Las Colinas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Ubicación            | Managua, Managua.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Sectores atendidos   | <p><u>Barrios:</u> Jardines de Veracruz, 11 de Mayo, Omar Torrijos, Pablo Úbeda, Farabundo Martí, La Fuente, Canadá, Augusto César Sandino, Sócrates Sandino, Blanca Arauz, Che Guevara, Enrique Smith, Walter Ferreti, Grenada, 18, 28 y 30 de Mayo, René Polanco, Germán Pomares, Naciones Unidas, Liberia, México, Villa Pedro Joaquín Chamorro, Plaza El Sol, Los Gauchos y Unión Soviética</p> <p><u>Colonias:</u> Los Robles, Rubenia, sector sur Nicarao, 14 de Septiembre, Villa Austria, sector norte de Las Colinas, Fernando Manzanares, sector oeste de la Colonia Centroamérica, Las Cumbres, Villa Italia, Villa Fonta Este, San Isidro de la Cruz Verde, sector este Planes de Altamira y Bel-Air, Km 4 al 5½ carretera Managua – Masaya.</p> <p><u>Repartos:</u> Shick, Villa Cuba, Altos y El Mirador de Santo Domingo, Serrano, Altamira D'Este, Bosques de Altamira, Pancasan, Altamira D'este, La Fise.</p> <p><u>Urbanizaciones:</u> La Castellana y Lomas de Notre Dame.</p> <p>Hospital Roberto Calderón, Proyecto Piloto, Molinos Nicarao, Musa Industrial, Enitel, Enacal, Centro Comercial Managua, Estación V de Policía, Hotel Princess, Consejo Supremo Electoral, Real Intercontinental Metrocentro, Metrocentro, Galerías Santo Domingo.</p> <p>Colegios Independencia y 14 de Septiembre</p> |
| Población atendida   | 244,969 habitantes.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

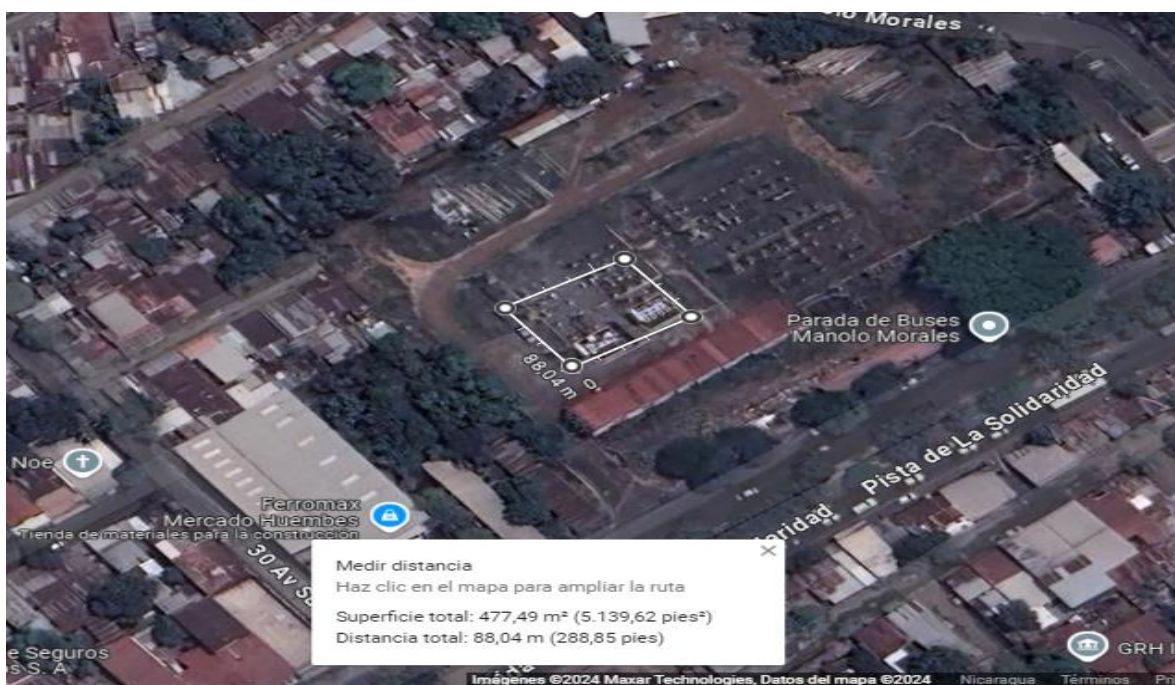
Nota: Tomada de [https://www.enatrel.gob.ni/wp-content/uploads/2017/05/Sub\\_Altamira2.pdf](https://www.enatrel.gob.ni/wp-content/uploads/2017/05/Sub_Altamira2.pdf)

Ilustración 39. Foto satelital de Subestación Altamira que delimita la superficie ocupada de sus instalaciones.



Nota: Foto tomada de Google maps.

Ilustración 40. Foto satelital de Subestación Altamira que representa la superficie ocupada por su alternativa GIS.



Nota: Foto tomada de Google maps.

Ilustración 41. Foto de Subestación Altamira.



Foto tomada con celular con permiso de ENATREL.

Ilustración 42. Foto de subestación GIS Ticuantepe III 138 kV como referencia de subestación GIS



*Nota: Foto adquirida con permiso de ENATREL.*

Ilustración 43. Foto de subestación GIS Ticuantepe III 138 kV como referencia de subestación GIS



*Nota: Foto adquirida con permiso de ENATREL.*

Ilustración 44. Foto de subestación GIS Ticuantepe III 138 kV como referencia de subestación GIS



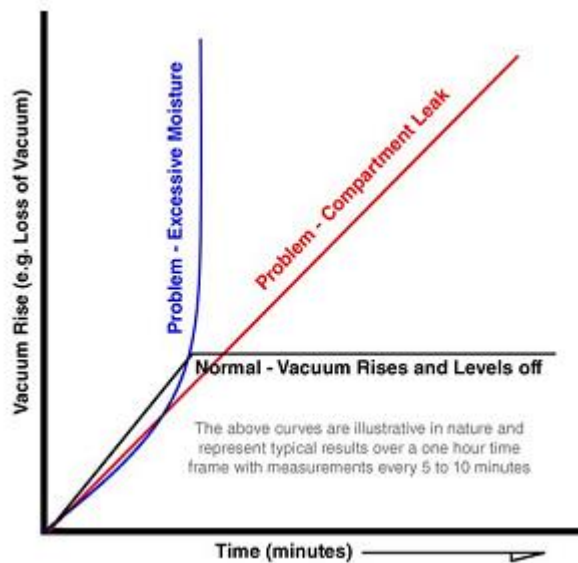
*Nota: Foto adquirida con permiso de ENATREL.*

Ilustración 45. Foto de subestación GIS Ticuantepe III 138 kV como referencia de subestación GIS



*Nota: Foto adquirida con permiso de ENATREL.*

Ilustración 46. Prueba de aumento de vacío



Nota: foto adquirida de Naidu, M.S. (2004) Gas Insulated Substations, I.K. International Pvt Ltd.

Ilustración 47. Comparativa en la superficie utilizada por subestaciones AIS y su alternativa GIS



Nota: Captura de pantalla tomada de <https://electrical-engineering-portal.com/choosing-ais-gis-substation-design-factor>

Ilustración 48. Etiquetas de procesamiento de zonas de gas.



Nota: Elaboración propia.

## Aplicación de metodologías de cálculos

### Simbología

Tabla 6. Simbología común en MIE-RAT 13

| Símbolo   | Descripción                                           |
|-----------|-------------------------------------------------------|
| $V_p$     | Voltaje de paso (V)                                   |
| $V_c$     | Voltaje de contacto (V)                               |
| $\rho_s$  | Resistividad de terreno ( $\Omega/m$ )                |
| $S_{min}$ | Sección transversal mínima (mm <sup>2</sup> )         |
| $t$       | Tiempo (segundos)                                     |
| $I_{cc}$  | Corriente de cortocircuito (amperios o kilo amperios) |
| $D$       | Diámetro del conductor de la sección normalizada (mm) |
| $L$       | Longitud de conductores (m)                           |
| $L'$      | Longitud de pica (m)                                  |

Tabla 7. Simbología en IEEE 80 std 485 (a)

| Símbolo | Descripción                                                    |
|---------|----------------------------------------------------------------|
| $L_c$   | Longitud total del conductor en la red horizontal (m)          |
| $L_p$   | Longitud de periféricos de la red (m)                          |
| $A$     | Área de la red (m <sup>2</sup> )                               |
| $L_x$   | Longitud máxima de la red en la dirección x (m)                |
| $L_y$   | Longitud máxima de la red en la dirección y (m)                |
| $D_m$   | Distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la red (mts) |
| $L_m$   | Longitud efectiva enterrada (m)                                |
| $L_R$   | Longitud total de todas las tomas de tierra (m)                |

Tabla 8. Simbología IEEE 80 std 485 (b)

| Símbolo                   | Descripción                                                                                                                     |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_r$                     | Longitud de cada barra de tierra (m)                                                                                            |
| $L_s$                     | Longitud efectiva del conductor enterrado(m)                                                                                    |
| $D$                       | Espaciamiento entre conductores paralelos(m)                                                                                    |
| $h$                       | Profundidad de los conductores de rejilla de tierra (m)                                                                         |
| $d$                       | Diámetro del conductor de la sección normalizada (m)                                                                            |
| $K_i$                     | Factor de irregularidad                                                                                                         |
| $K_s$                     | Factor geométrico                                                                                                               |
| $L_T$                     | Longitud total efectiva del conductor del sistema de puesta a tierra, incluida la rejilla y las varillas de puesta a tierra (m) |
| $n$                       | Factor geométrico compuesto de factores $n_a, n_b, n_c, n_d$                                                                    |
| $3I_o$                    | Corriente de falla simétrica en subestaciones para dimensionamiento de conductores (A)                                          |
| $t_c$                     | Duración de la corriente de falla para dimensionar el conductor de tierra (seg)                                                 |
| $E_{\text{toque } 50,70}$ | Tensión de toque tolerable para humanos con un peso corporal de 50 kg y 70 kg correspondientemente (V)                          |
| $E_{\text{paso } 50,70}$  | Tensión de paso tolerable para un ser humano con un peso corporal de 50 kg y 70 kg. (V)                                         |
| $R_g$                     | Resistencia del sistema de puesta a tierra ( $\Omega$ )                                                                         |
| $t_f$                     | Duración de la corriente de falla para determinar el factor de decremento (seg)                                                 |
| $I_G$                     | Corriente máxima de red que fluye entre la red de tierra y la tierra circundante (A)                                            |
| $K_h$                     | Factor de ponderación correctivo que enfatiza los efectos de la profundidad de la cuadrícula, método simplificado               |
| $t_s$                     | Duración de la descarga para determinar la corriente corporal admisible (seg)                                                   |

## Aplicación de Selección de Conductor

Se considerará como potencia base la potencia del transformador (40 MVA) instalado previamente en la subestación Altamira según ilustración 38, debido a que, por cuestiones de diseño de la compartimentación y aislamiento. Además, el transformador es el equipo más

crítico en la subestación, ya que la mayor parte de averías graves e incendios se producen a consecuencia de un fallo en el mismo.

Para los cálculos se utilizará la siguiente formula:

$$I_n = \frac{S_b}{U * \sqrt[2]{3}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $S_b$  es la potencia base y  $U$  representa la tensión que se considerada en cada caso.

#### **Intensidad nominal en 138 kV**

$$I_{n-1} = \frac{S_b}{\sqrt[2]{3} * U} = \frac{40 * 1000000 \text{ VA}}{\sqrt[2]{3} * 138 * 1000 \text{ V}} = 167.3479041 \text{ A} \approx 167.35 \text{ A} \quad \text{Ecuación 6}$$

#### **Intensidad nominal en 13.8 kV**

$$I_{n-2} = \frac{S_b}{\sqrt[2]{3} * U} = \frac{40 * 1000000 \text{ VA}}{\sqrt[2]{3} * 13.8 * 1000 \text{ V}} = 1673.479041 \text{ A} \approx 1673.48 \text{ A} \quad \text{Ecuación 7}$$

En la parte de M.T del lado de baja tensión (120 V) se tomará como potencia de este transformador de 150 kVA según la tabla de la ilustración 49.

Ilustración 49. Tabla de selección de potencia de transformador de acuerdo a nivel de tensión.

| POTENCIA<br>(KVA) | NIVEL DE<br>TENSION<br>(KV) | DIMENSIONES MAXIMAS (mm) |      |      |      |      | ACEITE<br>(L) | PESO TOTAL<br>(Kg.) |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------|------|------|------|------|---------------|---------------------|
|                   |                             | A                        | B    | C    | D    | E    |               |                     |
| 150               | 15                          | 1610                     | 1670 | 1750 | 1400 | 1300 | 360           | 1430                |
|                   | 25                          | 1610                     | 1600 | 1750 | 1400 | 1300 | 410           | 1380                |
| 250               | 15                          | 1600                     | 1600 | 1550 | 1320 | 1310 | 390           | 1500                |
|                   | 25                          | 1600                     | 1600 | 1550 | 1320 | 1310 | 450           | 1700                |
| 300               | 15                          | 1650                     | 1650 | 1750 | 1400 | 1300 | 490           | 1740                |
|                   | 25                          | 1650                     | 1650 | 1750 | 1400 | 1300 | 550           | 1870                |
| 500               | 15                          | 1740                     | 1700 | 1750 | 1400 | 1300 | 580           | 2490                |
|                   | 25                          | 1740                     | 1700 | 1750 | 1400 | 1300 | 650           | 2850                |
| 750               | 15                          | 1850                     | 2000 | 1850 | 1700 | 1400 | 730           | 3200                |
|                   | 25                          | 1850                     | 2000 | 1850 | 1700 | 1400 | 830           | 3500                |
| 1000              | 15                          | 2150                     | 2100 | 2000 | 1850 | 1450 | 900           | 3800                |
|                   | 25                          | 2200                     | 2100 | 2000 | 1850 | 1450 | 1000          | 4300                |

Nota: esta tabla está sujeta a cambio. De acuerdo a las directrices de algún otro catálogo

### Intensidad nominal de 120 V.

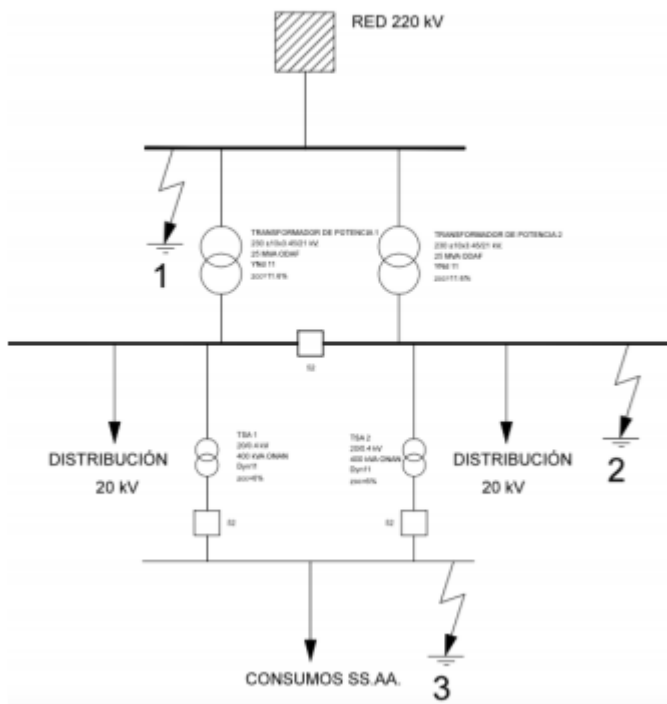
$$I_{n-2} = \frac{S_b}{\sqrt{3} * U} = \frac{150 * 1000 VA}{\sqrt{3} * 120 V} = 721.6878365 A \approx 721.69 A \quad \text{Ecuación 8}$$

### Intensidades de cortocircuito

Se calculará la corriente de cortocircuito en cada uno de los puntos críticos de la subestación.

Las corrientes calculadas determinarán, junto con las corrientes nominales, la sección de los conductores a emplear y las características térmicas del aparellaje. En el siguiente diagrama unifilar se muestra la configuración habitual de utilización de la subestación con tecnología GIS y los distintos puntos críticos de cortocircuitos que se considerarán en cada uno de los niveles de tensión.

Ilustración 50. Diagrama unifilar simplificado.



Nota: elaboración propia

## Cortocircuito en barras 138 kV

En barras de 138 kV, la red eléctrica tiene una potencia de cortocircuito de aproximadamente 306.75 MVA, como se puede ver en los siguientes datos:

Ilustración 51. Resultados de simulación para corriente de cortocircuito.

```
VOLTAGE FACTOR C= 1.10,  NOMINAL FREQUENCY=60.0 Hz,  BREAKING CURRENT at TIME= 0.083 seconds
<-SCMVA-> <-Sym I''k rms--> <-ip(B)-> <-ip(C)-> <DC Ib(C)> <Sym Ib-> <Asym Ib>
/I/ AN(I) /I/ /I/ /I/ /I/ /I/
X----- BUS -----X      MVA    AMP    DEG    AMP    AMP    AMP    AMP    AMP
4225 [MGA-69 69.000] 3PH    306.75  2566.7  -78.12  6434.7  6311.3  173.3  2566.7  2572.6
Note - ip(B) currents include safety factor multiplier (1.15).
THEVENIN IMPEDANCE, X/R (OHM)  Z+:/17.073/78.124, 4.75501
```

Nota: Tomado de una simulación en PSS/E de SIEMENS hecho con datos de ENATREL

Por tanto, la intensidad de cortocircuito será:

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} * U} = \frac{306.75 * 1000000 \text{ VA}}{\sqrt{3} * 138 * 1000 \text{ V}} = 1283.34924 \text{ A} \approx 1283.35 \text{ A} \quad \text{Ecuación 9}$$

## Impedancia de red

. La impedancia de la red en 13.8 kV será:

$$Z_R = \frac{U^2}{S_{CC}} = \frac{(13.8 * 1000 \text{ v})^2}{306.75 * 10000000 \text{ VA}} = \frac{190.44 \text{ V}^2}{306.75 \text{ VA}} = 0.620831295 \Omega$$
$$\approx 0.62 \Omega$$

*Ecuación 10*

Es necesario considerar en este caso la impedancia de los transformadores, además de la impedancia de la red calculada anteriormente. Se supondrán ambas impedancias reactancias puras. El caso más desfavorable será aquel en el que los dos transformadores estén conectados a una misma barra en 13.8 kV, ya que estarán en paralelo y su impedancia equivalente se verá reducida a la mitad.

Se tomará en consideración la impedancia de cortocircuito en su valor máximo ya que no se dispone por el momento de un catálogo que facilite la elección de un transformador en específico.

*Ilustración 52. Directrices de impedancia de cortocircuito.*

**Impedancia de Cortocircuito**

- ☐ **impedancia de cortocircuito**
  - impedancia entre los devanados del primario y secundario
  - valor máximo de la impedancia de cortocircuito: **14 %**
  - condiciones especiales:
    1. impedancia con valor superior al **14%** pueden ser aceptados en situaciones especiales como para limitar las corrientes de cortocircuito
    2. o valor mínimo de impedancias debe tener en cuenta os valores permisible de la corriente de cortocircuito (valor de operación y de planificación de largo plazo) de lo equipo
    3. para un transformador adicionado a una subestación existente, os valores mínimos e máximos de la impedancia de cortocircuito deberán cumplir con los requisitos de operación en paralelo

La impedancia de cada transformador de servicios auxiliares será:

$$Z_{TSA} = U_{cc} * \frac{U^2}{S_B} = 0.14 * \frac{13.8^2}{40} = 0.66654 \, \Omega \quad \text{Ecuación 11}$$

Por tanto, la impedancia equivalente de la red y los dos transformadores acoplados será:

$$Z = 0.62 + \frac{0.66654}{2} = 0.95327 \, \Omega \quad \text{Ecuación 12}$$

Finalmente, la corriente de cortocircuito será:

$$I_{CC} = \frac{U}{\sqrt[2]{3} * Z} = \frac{13.8 * 1000 \, V}{\sqrt[2]{3} * 0.95327} = 8358.003205 \, A \approx 8.358 \, kA \quad \text{Ecuación 13}$$

Para una futura ampliación de la subestación de dos transformadores adicionales, de las mismas características, se tiene, considerando nuevamente el caso más desfavorable de cuatro transformadores en paralelo:

$$Z = 0.62 + \frac{0.66654}{4} = 0.786635 \, \Omega \quad \text{Ecuación 14}$$

$$I_{CC} = \frac{U}{\sqrt[2]{3} * Z} = \frac{13.8 * 1000 \, V}{\sqrt[2]{3} * 0.632075} = 10128.50142 \, A \approx 10.129 \, kA \quad \text{Ecuación 15}$$

### **Cortocircuito en barras de servicios auxiliares**

Se debe añadir a las impedancias de la red y de los transformadores la impedancia del transformador de servicios auxiliares. En este caso, todos los cálculos se realizan en baja tensión. Se considera en el diseño que el enclavamiento mecánico entre los transformadores de servicios auxiliares y la unidad de control de servicios auxiliares impide que estén en paralelo. La impedancia de la red en 120 V será:

$$Z_R = \frac{U^2}{S_{CC}} = \frac{(120 \text{ v})^2}{306.75 * 10000000 \text{ VA}} = \frac{14400 \text{ V}^2}{306.75 * 10^6 \text{ VA}} = 4.69437 * 10^{-5} \Omega$$

$$\approx 4.7 * 10^{-5} \Omega$$

Ecuación 17

La impedancia de cada transformador de potencia será:

$$Z_T = U_{cc} * \frac{U^2}{S_B} = 0.14 * \frac{0.12^2}{40} = 5.04 * 10^{-5} \Omega$$

Ecuación 16

A continuación, se tomará como ejemplo lo seleccionado por la ABB de un ejemplo encontrado en internet debido a la carencia de un catálogo que facilite la selección del transformador de servicio auxiliar.

Ilustración 53. Ejemplo de transformador de servicio auxiliar.

### SSVT de alta eficiencia – Baja tensión

Eficiencia y regulación



Ejemplo : SSVT-750-67

67 kVA, 750 kV BIL

Relación: 86600/231 V

Impedancia: 4.04 %

Pérdidas en el cobre: 441 W

Pérdidas en el núcleo: 307 W

| % de carga | Cos Φ | Eficiencia % | Cos Φ | Regulación % |
|------------|-------|--------------|-------|--------------|
| 100        | 0.85  | 98.7         | 0.85  | 2.7          |
| 50         | 0.85  | 98.6         | 1     | 0.74         |
| 100        | 1     | 98.9         |       |              |
| 50         | 1     | 98.8         |       |              |

©ABB  
August 7, 2019

| Slide 17

ABB

Nota: extraído de Transformadores de servicios auxiliares Micro subestaciones, renovables, Electrificación rural, servicios auxiliares ABB Chile 2019.

La impedancia del transformador de servicios auxiliares será:

$$Z_{TSA} = U_{cc} * \frac{U^2}{S_B} = 0.0404 * \frac{120^2}{67 * 1000} = 8.683 * 10^{-3} \Omega$$

Ecuación 18

Por tanto, la impedancia equivalente de la red, los dos transformadores de potencia acoplados y solo uno de los dos transformadores de servicios auxiliares:

$$Z = 8.683 * 10^{-3} + 4.7 * 10^{-5} + \frac{5.04 * 10^{-5}}{2} = 8.7552 * 10^{-3} \Omega \quad \text{Ecuación 20}$$

Finalmente, la corriente de cortocircuito será:

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt[2]{3} * Z} = \frac{120 V}{\sqrt[2]{3} * 8.7552 * 10^{-3} \Omega} = 7913.243821 A \approx 7.913 kA \quad \text{Ecuación 19}$$

En el caso de la ampliación, este resultado es prácticamente idéntico al obtenido en el caso anterior:

$$Z = 8.683 * 10^{-3} + 4.7 * 10^{-5} + \frac{5.04 * 10^{-5}}{4} = 8.7426 * 10^{-3} \Omega \quad \text{Ecuación 21}$$

Finalmente, la corriente de cortocircuito será:

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt[2]{3} * Z} = \frac{120 V}{\sqrt[2]{3} * 8.7426 * 10^{-3} \Omega} = 7924.648537 A \approx 7.925 kA \quad \text{Ecuación 22}$$

Por tanto, los interruptores de los cuadros deben tener un poder de corte superior a 7.925 kA.

## CALCULOS DE LAS SECCIONES DE LOS CONDUCTORES

A partir de los cálculos de intensidad nominal y de cortocircuito de la sección anterior, y aplicando los oportunos factores de corrección según, se calcularán las secciones necesarias de los conductores. Finalmente, se elegirá la sección normalizada del catálogo del fabricante. Todos los conductores serán de aluminio.

### CONDUCTORES DE 138 kV

Los conductores de 138 kV conectan las salidas de las celdas de transformador con el primario de los transformadores de potencia. El modo de instalación de los mismos será en canalizaciones de hormigón, como se puede ver en la implantación adjunta. El reglamento de Líneas de Alta Tensión no ofrece información sobre los factores de corrección aplicables

a conductores con tensiones de aislamiento superiores a 18/30 kV. Sin embargo, la intensidad de la mínima sección normalizada del fabricante ( $300 \text{ mm}^2$ ) es de 600 A, que es de al menos unas 4 veces superior a la intensidad nominal calculada anteriormente. Además, las longitudes requeridas de estos conductores no justifican hacer un estudio de la forma de conexión de las pantallas de los cables. Finalmente, se escoge un conductor de sección normalizada  $240 \text{ mm}^2$ .

### **CONDUCTORES DE 13.8 kV**

Los conductores de 13.8 kV conectan los secundarios de los transformadores de potencia con las celdas de transformadores de media tensión. El modo de instalación de los mismos será en canalizaciones de hormigón, como se puede ver en la implantación adjunta.

En primer lugar, se comprueba una primera sección normalizada del fabricante. La intensidad nominal resulta ser de 1673.48 A, mayor de la máxima corriente admisible según el catálogo del fabricante. Por tanto, deberán emplearse tres ternas de tres cables unipolares.

Debido a que la tensión de aislamiento del cable será inferior a 30 kV, se aplicará lo indicado en el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de Alta Tensión y sus instrucciones técnicas complementarias.

Los factores de corrección aplicables, en este caso, serán:

- Temperatura de servicio. La temperatura media en el interior de la subestación se estima en torno a  $25^\circ\text{C}$ . Se debe incrementar esta temperatura en 15 K, correspondiente al modo de instalación en canales revisables, de acuerdo con la ITC-LAT 6. Por tanto, el factor de corrección será 1.00, ya que  $40^\circ\text{C}$  es la temperatura de diseño de los conductores.

- Agrupación de ternas de cables unipolares tendidos sobre bandejas continuas, con circulación de aire restringida, y separación de los cables equivalente a la longitud de un diámetro. Según la ilustración 54 de la ITC-LAT 06, el factor de corrección será 0.79, para dos ternas de cables.

*Ilustración 54. Factor de corrección para cables tripolares.*

**Tabla 15. Cables tripolares o ternos de cables unipolares tendidos sobre bandejas continuas (la circulación del aire es restringida), con separación entre cables igual a un diámetro d**

| Número de Bandejas | Factor de corrección                            |      |      |      |      |
|--------------------|-------------------------------------------------|------|------|------|------|
|                    | Número de cables tripolares o ternos unipolares |      |      |      |      |
|                    | 1                                               | 2    | 3    | 6    | 9    |
| 1                  | 0,95                                            | 0,90 | 0,88 | 0,85 | 0,84 |
| 2                  | 0,90                                            | 0,85 | 0,83 | 0,81 | 0,80 |
| 3                  | 0,88                                            | 0,83 | 0,81 | 0,79 | 0,78 |
| 6                  | 0,86                                            | 0,81 | 0,79 | 0,77 | 0,76 |

Nota: extraído de ITC-LAT 06

La intensidad máxima permanente sobre los conductores de la misma fase será:

$$I = \left( \prod_i F_i \right) * I_n = 1.00 * 0.79 * 1673.48 = 1322.05 \text{ A} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$I_{cond} = \frac{1322.05 \text{ amp}}{3} = 440.683 \text{ amp} \quad \text{Ecuación 24}$$

Si bien la consideración para seleccionar el conductor es con la intensidad máxima admisible en servicio permanente y con corriente alterna.

Ilustración 55. Intensidades máximas admisibles para cables tripolares.

**Tabla 13. Intensidades máximas admisibles (A) en servicio permanente y con corriente alterna. Cables unipolares aislados de hasta 18/30 kV instalados al aire**

| Sección (mm <sup>2</sup> ) | EPR |     | XLPE |     | HEPR |     |
|----------------------------|-----|-----|------|-----|------|-----|
|                            | Cu  | Al  | Cu   | Al  | Cu   | Al  |
| 25                         | 140 | 110 | 155  | 120 | 160  | 125 |
| 35                         | 170 | 130 | 185  | 145 | 195  | 150 |
| 50                         | 205 | 155 | 220  | 170 | 230  | 180 |
| 70                         | 255 | 195 | 275  | 210 | 295  | 225 |
| 95                         | 310 | 240 | 335  | 255 | 355  | 275 |
| 120                        | 355 | 275 | 385  | 295 | 410  | 320 |
| 150                        | 405 | 315 | 435  | 335 | 465  | 360 |
| 185                        | 465 | 360 | 500  | 385 | 535  | 415 |
| 240                        | 550 | 425 | 590  | 455 | 630  | 495 |
| 300                        | 630 | 490 | 680  | 520 | 725  | 565 |
| 400                        | 740 | 570 | 790  | 610 | 840  | 660 |

Nota: extraído de ITC-LAT 06

Se elegirá la sección de 240 mm<sup>2</sup> del fabricante tomado como ejemplo.

La sección, según el cálculo de cortocircuito, se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\frac{I_{cc}}{S} = \frac{K}{\sqrt[2]{t_{cc}}} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde  $t_{cc}$  es el tiempo de despeje de la falta (0.5 s) y K es un parámetro que se extrae del reglamento. **Para el aislamiento de polietileno reticulado, K toma el valor de 133.** La sección mínima, por tanto, será:

$$S = \frac{I_{cc} * \sqrt[2]{t_{cc}}}{k} = \frac{10.129 * 10^3 * \sqrt[2]{0.5}}{133} = 53.85 \text{ mm}^2 \quad \text{Ecuación 26}$$

Esta sección es mucho menor que la calculada anteriormente. Por lo tanto, la sección de cada conductor unipolar será de 240 mm<sup>2</sup> y serán necesarias en total tres ternas de cables dispuestos en seis bandejas.

## **DIMENSIONAMIENTOS DE LAS BATERIAS DE 125 V CC**

Estos elementos son requeridos en todas las subestaciones por la necesidad que demanda algunos equipos de corriente directa

Estas han demostrado durante mucho tiempo su confiabilidad al no sufrir de desgaste mecánico y su sencilla funcionalidad.

### **TIPOS DE BATERIAS**

Actualmente se utilizan dos tipos de baterías las cuales son:

- Plomo-acido
- Alcalinas (níquel-cadmio y níquel-hierro).

Los principales componentes de la batería de plomo se componen:

1. Placa positiva
2. Placa negativa
3. Electrolito
4. Separadores

Placa positiva: Su construcción se basa en la combinación de óxidos de plomo y ácido sulfúrico

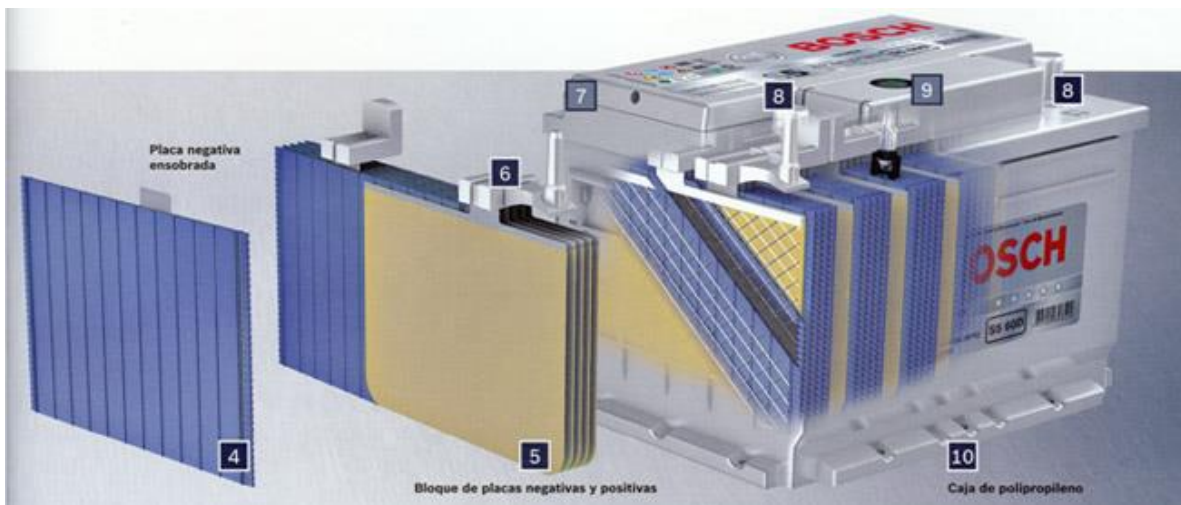
Existen del tipo tubular, como el ejemplo mostrado en la ilustración 56 y tipo empastado visto en la ilustración 57, donde la de tipo tubular otorga el beneficio de lograr mayor duración.

Ilustración 56 Batería de plomo Acido con un diseño de placa tubular



tomado de <https://www.emeisa.mx/opzs.php>

Ilustración 57. batería de plomo acido de tipo empastado.



Tomado de <http://www.energetika.com.ar/constitucion.html>

Placa negativa: formada por plomo esponjoso.

Electrolito: Es una solución ácido sulfúrico diluido en agua con una densidad de 1.21 a 25°C a su 100% de carga.

Separadores: material micro poroso resistente al ácido.

Para baterías del tipo alcalina:

1. Placa positiva
2. Placa negativa
3. Separadores
4. Electrolito

Placa positiva: su construcción se basa en la combinación de óxidos de plomo y ácido sulfúrico.

Placa negativa: constituido por óxido de Cadmio.

Separadores: constituido de barras de polietileno o hule

Electrolito: Es un hidróxido de potasio a una densidad de 1.17 a 25°C.

En la ilustración 58 se presenta el ejemplo de un banco de baterías utilizado como fuente de respaldo en caso de presentarse una falla en los cargadores de DC.

*Ilustración 58. Banco de baterías de níquel cadmio.*



Tomado de <https://www.emeisa.mx/vtx1l-vtx1m.php>

Por consiguiente, al ser una fuente de alimentación cuenta con diferentes tensiones, las cuales se muestran en la tabla siguiente para acumuladores en volts por celda y en la tabla siguiente a la anterior mencionada se muestran los valores correspondientes para un sistema de 125 y 48 volts.

Es importante tener presente que las baterías de plomo-acido tiene un ciclo de vida aproximadamente de 23 años. Mientras que la de níquel-cadmio es de 30 años.

Necesidad de servicio: Es indispensable conocer las características físicas de los aparatos que serán alimentadas por el banco, así como el ciclo de operación. Algunas de las cargas conectadas a las barras se mencionan a continuación:

- Bobinas de cierre
- Bobina de disparo
- Luces piloto de señalización
- Relé de protección
- Relé auxiliar
- Cuadros de alarma

Donde la tendencia es utilizar una tensión nominal de 125 VCD para equipos de servicio propios y para todas las tensiones para subestaciones al cual estén diseñados.

Para los demás equipos en listados anteriormente el rango promedio es de +/- 20% del valor nominal.

Por lo cual se menciona en las normas vigentes que el voltaje mínimo de operación para los bancos es de 105 VCD y el máximo es de 140 VCD.

La corriente de descarga depende literalmente de las cargas alimentadas y el ciclo de operación de esta.

Localización física: La norma recomienda las características que debe tener el local donde se instala, teniendo cuidado especialmente en detalles como lo son; el acercamiento a cualquier fuente radiante de calor tales como tubos de vapor, rayos del sol, estos con el fin de evitar diferencias de temperaturas entre las celdas y el electrolito que sea mayor a 3°C, lo que ocasiona un incremento de pérdidas internas.

El cuarto deberá estar ventilado y protegido contra humedad aceite y polvo.

La temperatura de operación normal de las baterías es de 25°C, sobre esta base se estima a la vida y se determina su capacidad, por lo tanto, se deberá mantener una temperatura por debajo de los 23 °C.

Factor de corrección de temperatura

La capacidad disponible de una celda se ve afectada por su temperatura de funcionamiento. Si el electrolito más bajo esperado la temperatura está por debajo de la temperatura nominal de la batería, seleccione una celda lo suficientemente grande como para tener la capacidad requerida. disponible a la temperatura más baja esperada. Si la temperatura más baja esperada del electrolito está por encima de la nominal temperatura de la batería, es una práctica conservadora seleccionar un tamaño de celda que coincida con la capacidad requerida en la temperatura estándar y reconocer el aumento resultante en la capacidad disponible como parte del diseño general margen.

La Tabla siguiente enumera los factores de corrección del tamaño de celda para varias temperaturas para celdas de plomo-ácido con nominal 1.215 Gravedad específica. Para

temperaturas no enumeradas dentro del rango de la Tabla antes mencionada, interpolar entre valores adyacentes y redondear a dos decimales. Consulte con el fabricante los factores para la batería específica que se está evaluando.

*Ilustración 59. Factores de corrección del tamaño de celda para la temperatura para celdas ventiladas y VRLA*

| Electrolyte temperature (°C)                                                                                                                                                                 | Electrolyte temperature (°F) | Temperature correction factor | Electrolyte temperature (°C) | Electrolyte temperature (°F) | Temperature correction factor |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 4.4                                                                                                                                                                                          | 40                           | 1.300                         | 26.1                         | 79                           | 0.987                         |
| 7.2                                                                                                                                                                                          | 45                           | 1.250                         | 26.7                         | 80                           | 0.980                         |
| 10.0                                                                                                                                                                                         | 50                           | 1.190                         | 27.2                         | 81                           | 0.976                         |
| 12.8                                                                                                                                                                                         | 55                           | 1.150                         | 27.8                         | 82                           | 0.972                         |
| 15.6                                                                                                                                                                                         | 60                           | 1.110                         | 28.3                         | 83                           | 0.968                         |
| 18.3                                                                                                                                                                                         | 65                           | 1.080                         | 28.9                         | 84                           | 0.964                         |
| 18.9                                                                                                                                                                                         | 66                           | 1.072                         | 29.4                         | 85                           | 0.960                         |
| 19.4                                                                                                                                                                                         | 67                           | 1.064                         | 30.0                         | 86                           | 0.956                         |
| 20.0                                                                                                                                                                                         | 68                           | 1.056                         | 30.6                         | 87                           | 0.952                         |
| 20.6                                                                                                                                                                                         | 69                           | 1.048                         | 31.1                         | 88                           | 0.948                         |
| 21.1                                                                                                                                                                                         | 70                           | 1.040                         | 31.6                         | 89                           | 0.944                         |
| 21.7                                                                                                                                                                                         | 71                           | 1.034                         | 32.2                         | 90                           | 0.940                         |
| 22.2                                                                                                                                                                                         | 72                           | 1.029                         | 35.0                         | 95                           | 0.930                         |
| 22.8                                                                                                                                                                                         | 73                           | 1.023                         | 37.8                         | 100                          | 0.910                         |
| 23.4                                                                                                                                                                                         | 74                           | 1.017                         | 40.6                         | 105                          | 0.890                         |
| 23.9                                                                                                                                                                                         | 75                           | 1.011                         | 43.3                         | 110                          | 0.880                         |
| 24.5                                                                                                                                                                                         | 76                           | 1.006                         | 46.1                         | 115                          | 0.870                         |
| 25.0                                                                                                                                                                                         | 77                           | 1.000                         | 48.9                         | 120                          | 0.860                         |
| 25.6                                                                                                                                                                                         | 78                           | 0.994                         |                              |                              |                               |
| NOTE—This table is based on lead-acid nominal 1.215 specific gravity cells rated at 25 °C (77 °F). For cells with other specific gravities or rated temperatures, refer to the manufacturer. |                              |                               |                              |                              |                               |

Nota: extraída de “IEEE std 485-2020”.

Es muy recomendable que el banco de baterías se encuentre lo más cercano a la carga con la finalidad de evitar caídas de tensión considerables.

Debido a que, al aumentar, sobre 25°C, se incrementan las pérdidas, por lo que se aplica factores de corrección de temperatura para determinar la capacidad en amper-hora del banco de baterías, los factores de corrección deberán solicitarse al fabricante.

Tiempo de descarga: Actualmente CFE utiliza un régimen de descarga de un tiempo de 8 horas.

Tiempo de recarga: Se tienen como recomendación el mismo tiempo de descarga, 8 horas.

Ciclo de descarga: Se deberá considerar el ciclo de descarga más crítico. Para esto, deberá suponerse que la demanda más crítica en corriente directa se presenta cuando se presenta el disparo simultáneo de todos los interruptores en el nivel de tensión (400, 230, 115, 69, 34.5 o 13.8 kV).

Se considera un tiempo de un minuto para esta maniobra. Posteriormente, se deberá considerarse una demanda constante durante 8 horas, ya que se tiene cargas como lo son las lámparas piloto, cuadro de alarmas, relevadores auxiliares, etc.

El banco de baterías deberá de contemplar el suministro de energía para abastecer la demanda igual a la primera durante un minuto para cerrar los interruptores.

#### Margen de diseño

Es prudente proporcionar un margen de capacidad para permitir adiciones imprevistas al sistema de CC y condiciones operativas no óptimas de la batería debido a un mantenimiento inadecuado, descarga reciente, condiciones ambientales, temperaturas más bajas de lo previsto, o una combinación de estos factores. Un método para proporcionar este diseño.

El margen es agregar entre un 10% y un 15% al tamaño de celda determinado mediante los cálculos. Si se espera que las distintas cargas crecen a diferentes ritmos, es más preciso aplicar la tasa de crecimiento esperada a cada carga durante un tiempo determinado y desarrollar un ciclo de trabajo a partir de los resultados.

El tamaño de celda calculado para una aplicación específica rara vez coincide exactamente con una celda disponible comercialmente, y es un procedimiento normal seleccionar la siguiente celda de mayor capacidad. La capacidad adicional obtenida puede considerarse parte del margen de diseño.

#### Factor de envejecimiento

Como regla general, para descargas de larga duración de una batería de plomo-ácido ventilada, la capacidad disminuye lentamente a lo largo del tiempo. la mayor parte de la vida útil de la batería, pero comienza a disminuir rápidamente en las últimas etapas, con la "rodilla" de la vida versus curva de capacidad que se produce cuando la capacidad restante se reduce a aproximadamente el 80% de la capacidad nominal. Esta característica está bien documentada para descargas a un ritmo de 1 hora o más.

Por eso, IEEE Std 450 e IEEE Std 1188 recomiendan que se reemplace la batería cuando su valor real. La capacidad cae al 80% de su capacidad nominal. Por lo tanto, para mantener la capacidad de la batería de cumplir con su diseño cargas a lo largo de su vida útil, la capacidad nominal de la batería debe ser al menos el 125% (factor de envejecimiento 1,25) de la carga esperada al final de su vida útil.

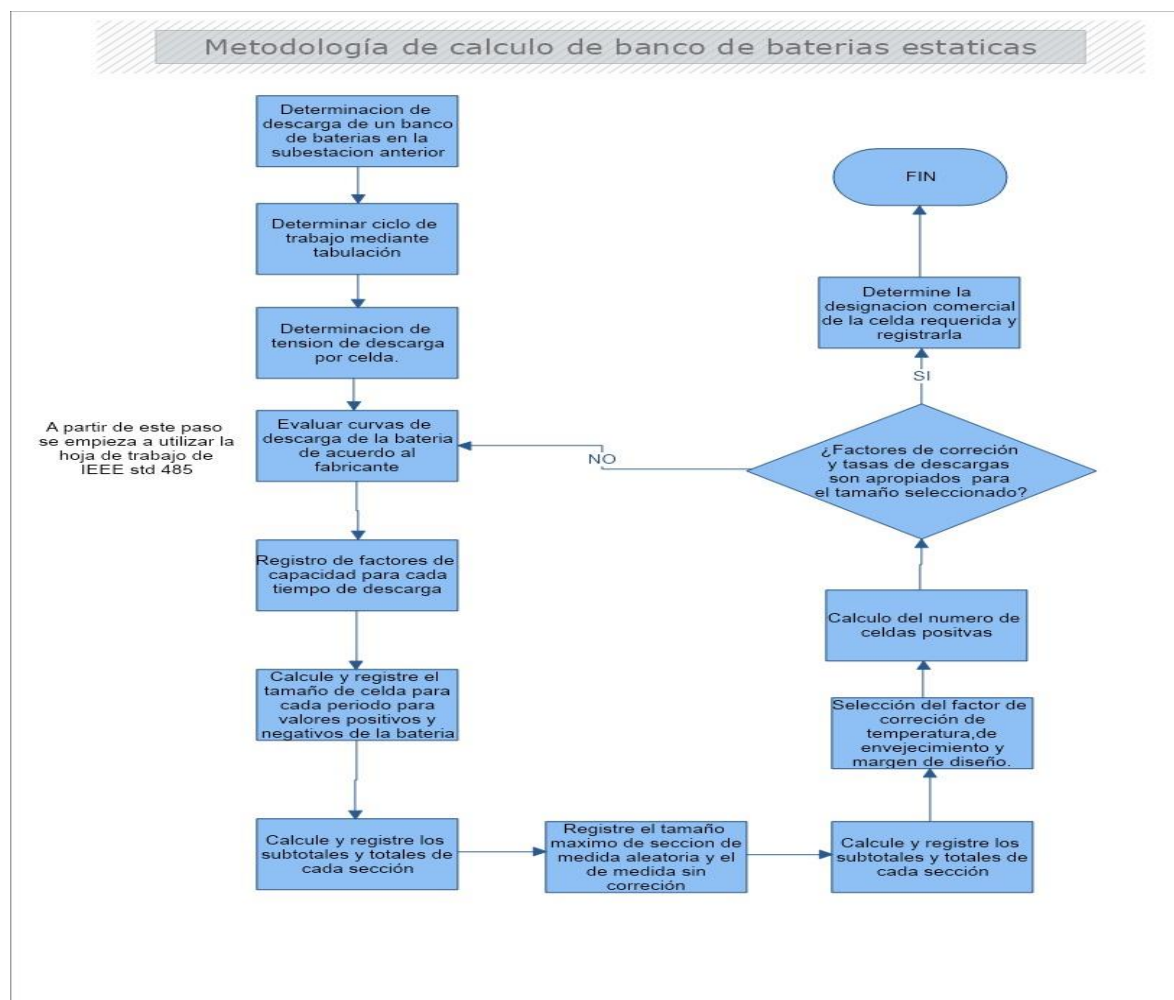
Para descargas de alta velocidad y corta duración de baterías de plomo-ácido ventiladas y todas las descargas de baterías VRLA,

Hay demasiadas variables para establecer definitivamente dónde se produce la “rodilla”. Por lo tanto, es razonable esperar su desempeño de corta duración caiga significativamente por debajo del 80% de su calificación antes de llegar a la “rodilla” en esa tasa, por lo que un factor de envejecimiento mayor puede ser apropiado. Consulte con el fabricante de la batería para obtener información adicional y recomendaciones.

Existen excepciones a esta regla. Por ejemplo, algunos fabricantes recomiendan que las baterías ventiladas con Planté, y Planté modificado serán reemplazados cuando su capacidad medida caiga por debajo del 100% de su capacidad nominal (1,00 factor de envejecimiento). Estos diseños mantienen una capacidad bastante constante durante toda su vida.

## Metodología de selección de banco de baterías

Ilustración 60. Metodología de selección de banco de baterías



Nota: elaboración propia.se puede entrar a más detalles en IEEE std 485.

Se puede notar que es necesario el uso de una hoja de trabajo que se muestra en la ilustración 60 en lo cual permite el registro de los ciclos de trabajos de la subestación y los factores de corrección que dependerá de la batería seleccionada y del voltaje promedio de la celda.

### Instrucciones para el uso adecuado de la hoja de trabajo de IEEE std 485

Instrucciones para el uso adecuado de la hoja de trabajo son como sigue:

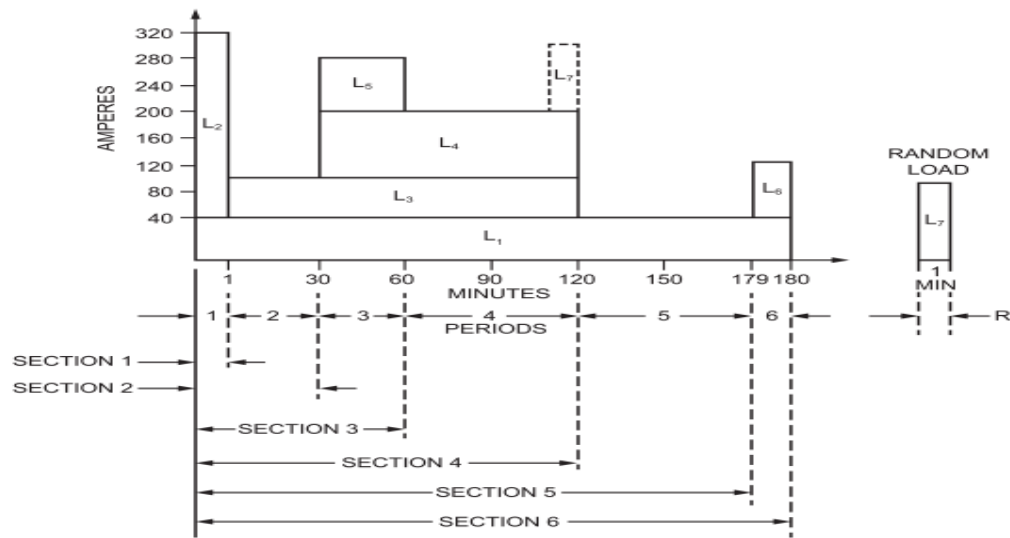
- a) Complete la información necesaria en el encabezado del cuadro. La temperatura y el voltaje registrados son los utilizados en los cálculos. El voltaje utilizado es el voltaje mínimo de la batería dividido por el número de celdas en la batería
- b) Complete los amperios y los minutos en las columnas (2) y (4) como lo indica el encabezado del encabezado de la sección de notaciones.
- c) Calcule y registre los cambios en amperios como se indica en la columna (3). Registre si los cambios son positivos o negativos.
- d) Calcule y registre los tiempos desde el inicio de cada período hasta el final de la sección como se indica en Columna (5).
- e) Registre en la columna (6) los factores de capacidad ( $R_t$  o  $K_t$ , de la literatura del fabricante) para cada tiempo de descarga calculado en la columna (5).
- f) Calcule y registre el tamaño de celda para cada período como se indica en la Columna (7). Tenga en cuenta la separación subcolumnas para valores positivos y negativos.
- g) Calcule y registre en la Columna (7) los subtotales y totales de cada sección como se indica.
- h) Registre el tamaño máximo de sección [el total más grande de la columna (7) en la línea (8), la sección de medida aleatoria en la Línea (9) y el de medida sin corrección en las Líneas (10) y (11)].
- i) Seleccione el factor de corrección del factor de corrección de temperatura o de los datos publicados por el fabricante para la temperatura que se muestra en el encabezado principal y regístrelo en la Línea (12).
- j) Ingrese el margen de diseño en la Línea (13) y el factor de envejecimiento en la Línea (14). Combinar líneas (11), (12), (13) y (14) como se indica y registre el resultado en la línea (15).

- k) Cuando la Línea (15) está en términos de amperios-hora y no coincide con la capacidad de una celda disponible, se requiere la siguiente celda más grande. Cuando la línea (15) muestra un número fraccionario de placas positivas, utilice el siguiente número entero mayor. Muestre el resultado en la línea (16).
- l) A partir del valor en la línea (16), la ecuación siguiente, cuando se utiliza el factor  $R_t$  (amperes por placa positiva) número total de placas =  $1 + (2 \times \text{número de placas positivas})$ , y la literatura del fabricante, determine la designación comercial de la celda requerida y registrarla en la Línea (17).
- m) Verifique que los factores y tasas de descarga utilizados sean apropiados para el tamaño seleccionado. Si no, la selección debe realizarse nuevamente utilizando los factores y tasas de descarga para el tamaño de celda seleccionado.

### Selección de banco de batería para el proyecto GIS hipotético.

El comportamiento de descarga de un banco de baterías en una subestación se observa en la figura siguiente.

Ilustración 61. Diagrama de ciclo de trabajo.



Nota: extraído de "IEEE std 485-2020".

En la siguiente tabulación que se mostrara puede ser construida con el diagrama de ciclo de trabajo de la batería. esta tabla es valiosa para completar la hoja de trabajo de selección de tamaño de celda

Ilustración 62. Tabulación del diagrama de ciclo de trabajo

| Period | Loads                   | Total amperes | Duration (min) |
|--------|-------------------------|---------------|----------------|
| 1      | $L_1 + L_2$             | 320           | 1              |
| 2      | $L_1 + L_3$             | 100           | 29             |
| 3      | $L_1 + L_3 + L_4 + L_5$ | 280           | 30             |
| 4      | $L_1 + L_3 + L_4$       | 200           | 60             |
| 5      | $L_1$                   | 40            | 59             |
| 6      | $L_1 + L_6$             | 120           | 1              |
| R      | $L_7$                   | 100           | 1              |

Nota: extraído de "IEEE std 485-2020"

La tensión del sistema es de 125 V, admitiendo variaciones de +10 % (137.5 V) y -15 % (106 V)

Se determina en primer lugar el número de elementos de la batería a partir de la tensión de flotación, cuyo valor será la tensión permanente que deberán soportar los equipos por lo que debe ser próximo al nominal. En este caso se aumenta éste un 5% para compensar la caída de tensión en los cables hasta los consumidores.

$$\text{numero de celdas} = \frac{U_n \times 1.05}{U_f} = \frac{125 \times 1.05}{2.2358} = 58.7038 \text{ elementos} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$U_{\text{descarga}} / \text{elemento} = \frac{125 \times 0.85}{58.7038} = 1.80993394 \frac{v}{\text{elem.}} \approx 1.81 \frac{v}{\text{elem.}} \quad \text{Ecuación 28}$$

En lo cual se mostrará la hoja de trabajo de selección de tamaño de celda en la ilustración 63 y en la ilustración 64 se puede observar es una curva de calificación compuesta hipotética para la celda XYZ fabricada por la Compañía ABC.

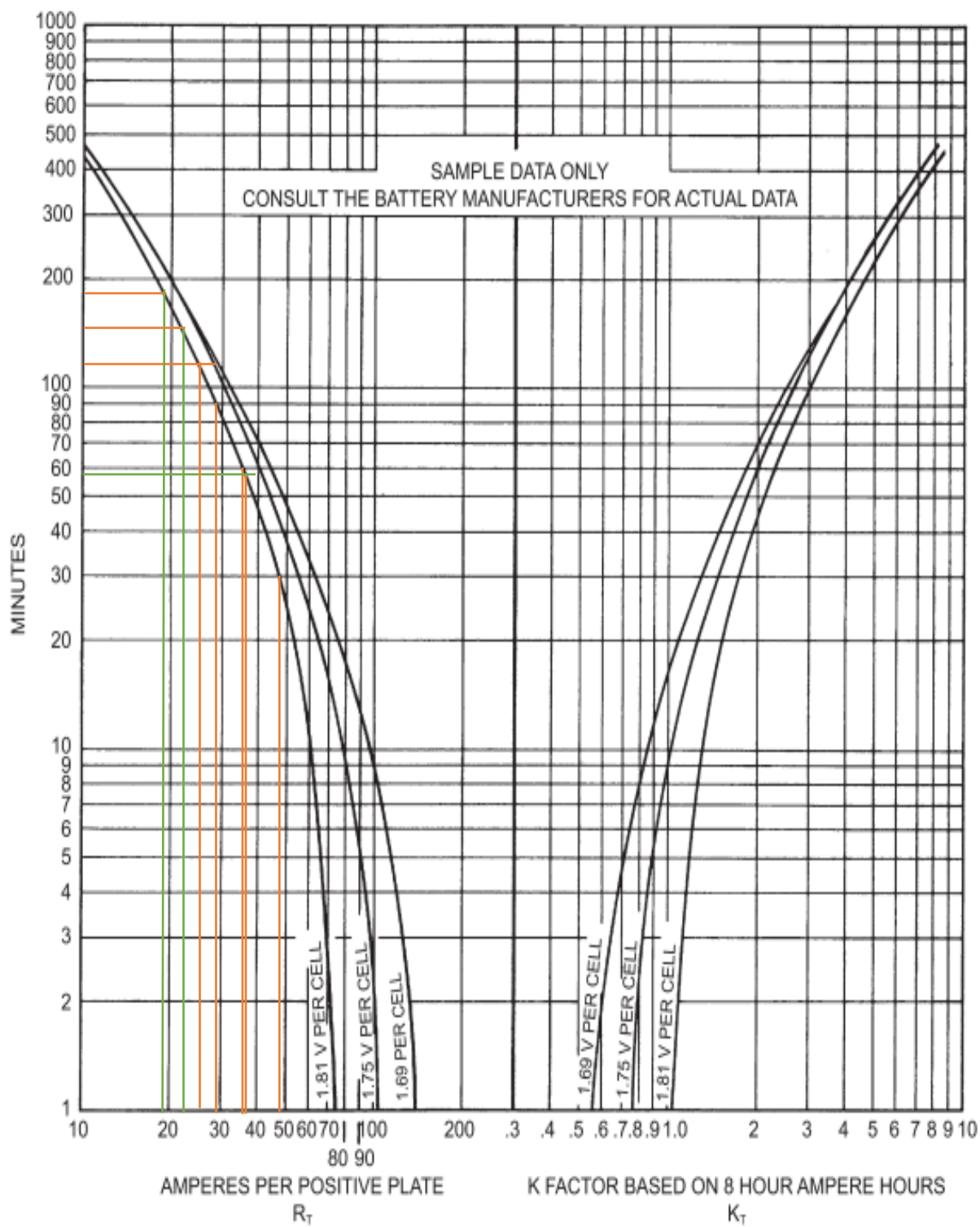
El gráfico proporciona valores para ambos tipos de factores de clasificación de capacidad para descargas iniciadas a 25 °C (77 °F) y termina cuando el voltaje promedio de la celda alcanza 1,81 V, 1,75 V o 1,69 V. y en la ilustración 64 se observará la tabla ya utilizada para el registro de los ciclos de trabajo y cálculo del tamaño de celda a utilizar con los datos anteriores para seleccionar de manera apropiada la batería.

Ilustración 63.hoja de trabajo de selección de tamaño de celda

| Project:                                                                                              |                       | Date:                    |                              | Page:                            |                                                                                             |                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Lowest Expected Electrolyte Temp: °F                                                                  | Minimum Cell Voltage: | Cell Mtg:                | Cell Type:                   | Sized By:                        |                                                                                             |                                                                                  |
| (1)                                                                                                   | (2)                   | (3)                      | (4)                          | (5)                              | (6)                                                                                         | (7)                                                                              |
| Period                                                                                                | Load (amperes)        | Change in Load (amperes) | Duration of Period (minutes) | Time to End of Section (minutes) | Capacity at T Min Rate (5A) Amps / Pos (R <sub>1</sub> ) or (6B) K Factor (K <sub>1</sub> ) | Required Section Size (3) + (5A) = Positive Plates or (3) × (6B) = Rated Amp Hrs |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             | Pos Values Neg Values                                                            |
| Section 1 - First Period Only - if A2 is greater than A1, go to section 2.                            |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| 1                                                                                                     | A1=                   | A1-0=                    | M1=                          | T=M1=                            |                                                                                             | ***                                                                              |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Sec 1 Total                                                                                 | ***                                                                              |
| Section 2 - First Two Periods Only - if A3 is greater than A2, go to section 3.                       |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| 1                                                                                                     | A1=                   | A1-0=                    | M1=                          | T=M1+M2=                         |                                                                                             |                                                                                  |
| 2                                                                                                     | A2=                   | A2-A1=                   | M2=                          | T=M2=                            |                                                                                             |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Sec 2 Sub Tot                                                                               |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Total                                                                                       | ***                                                                              |
| Section 3 - First Three Periods Only - if A4 is greater than A3, go to section 4.                     |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| 1                                                                                                     | A1=                   | A1-0=                    | M1=                          | T=M1+M2+M3=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 2                                                                                                     | A2=                   | A2-A1=                   | M2=                          | T=M2+M3=                         |                                                                                             |                                                                                  |
| 3                                                                                                     | A3=                   | A3-A2=                   | M3=                          | T=M3=                            |                                                                                             |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Sec 3 Sub Tot                                                                               |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Total                                                                                       | ***                                                                              |
| Section 4 - First Four Periods Only - if A5 is greater than A4, go to section 5.                      |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| 1                                                                                                     | A1=                   | A1-0=                    | M1=                          | T=M1+...M4=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 2                                                                                                     | A2=                   | A2-A1=                   | M2=                          | T=M2+M3+M4=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 3                                                                                                     | A3=                   | A3-A2=                   | M3=                          | T=M3+M4=                         |                                                                                             |                                                                                  |
| 4                                                                                                     | A4=                   | A4-A3=                   | M4=                          | T=M4=                            |                                                                                             |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Sec 4 Sub Tot                                                                               |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Total                                                                                       | ***                                                                              |
| Section 5 - First Five Periods Only - if A6 is greater than A5, go to section 6.                      |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| 1                                                                                                     | A1=                   | A1-0=                    | M1=                          | T=M1+...M5=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 2                                                                                                     | A2=                   | A2-A1=                   | M2=                          | T=M1+...M5=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 3                                                                                                     | A3=                   | A3-A2=                   | M3=                          | T=M3+M4+M5=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 4                                                                                                     | A4=                   | A4-A3=                   | M4=                          | T=M4+M5=                         |                                                                                             |                                                                                  |
| 5                                                                                                     | A5=                   | A5-A4=                   | M5=                          | T=M5=                            |                                                                                             |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Sec 5 Sub Tot                                                                               |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Total                                                                                       | ***                                                                              |
| Section 6 - First Six Periods Only - if A7 is greater than A6, go to section 7.                       |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| 1                                                                                                     | A1=                   | A1-0=                    | M1=                          | T=M1+...M6=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 2                                                                                                     | A2=                   | A2-A1=                   | M2=                          | T=M1+...M6=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 3                                                                                                     | A3=                   | A3-A2=                   | M3=                          | T=M1+...M6=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 4                                                                                                     | A4=                   | A4-A3=                   | M4=                          | T=M4+M5+M6=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 5                                                                                                     | A5=                   | A5-A4=                   | M5=                          | T=M5+M6=                         |                                                                                             |                                                                                  |
| 6                                                                                                     | A6=                   | A6-A5=                   | M6=                          | T=M6=                            |                                                                                             |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Sec 6 Sub Tot                                                                               |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Total                                                                                       | ***                                                                              |
| Section 7 - First Seven Periods Only - if A8 is greater than A7, go to section 8.                     |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| 1                                                                                                     | A1=                   | A1-0=                    | M1=                          | T=M1+...M7=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 2                                                                                                     | A2=                   | A2-A1=                   | M2=                          | T=M1+...M7=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 3                                                                                                     | A3=                   | A3-A2=                   | M3=                          | T=M1+...M7=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 4                                                                                                     | A4=                   | A4-A3=                   | M4=                          | T=M1+...M7=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 5                                                                                                     | A5=                   | A5-A4=                   | M5=                          | T=M5+M6+M7=                      |                                                                                             |                                                                                  |
| 6                                                                                                     | A6=                   | A6-A5=                   | M6=                          | T=M6+M7=                         |                                                                                             |                                                                                  |
| 7                                                                                                     | A7=                   | A7-A6=                   | M7=                          | T=M7=                            |                                                                                             |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Sec 7 Sub Tot                                                                               |                                                                                  |
|                                                                                                       |                       |                          |                              |                                  | Total                                                                                       | ***                                                                              |
| Random Equipment Load Only (if needed)                                                                |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| R                                                                                                     | AR=                   | AR-0=                    | MR=                          | T=MR=                            |                                                                                             | ***                                                                              |
| Maximum Section Size (8) _____ + Random Section Size (9) _____ = Uncorrected Size - (US) (10) _____.  |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| US (11) _____ × Temp Corr (12) _____ × Design Marg (13) _____ × Aging Factor (14) _____ = (15) _____. |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| When the cell size (15) is greater than a standard cell size, the next larger cell is required.       |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| (A) - Positive Plates.                                                                                |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| Required cell size (16) _____                                                                         |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| (B) - Ampere Hours.                                                                                   |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |
| Therefore cell (17) _____ is required.                                                                |                       |                          |                              |                                  |                                                                                             |                                                                                  |

Nota: extraído de "IEEE std 485-2020"

Ilustración 64. Curva de evaluación compuesta hipotética para la celda XYZ



Nota: extraído de "IEEE std 485-2020"

Ilustración 65. hoja de trabajo de selección de tamaño de celda

IEEE Std 485-2020  
IEEE Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stationary Applications

Project: banco de baterías para subestación 6.5 Date: 29/09/2023 Page: 1

| (1)                                                                                             | (2)                               | (3)                      | (4)                          | (5)                              | (6)                                                                                                                                 | (7)                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Lowest Expected Electrolyte Temp: <u>65°F</u>                                                   | Minimum Cell Voltage: <u>1.81</u> | Cell Mfg: <u>ABC</u>     | Cell Type: <u>XY2</u>        | Sized By: <u>J.W.A</u>           |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| Period                                                                                          | Load (amperes)                    | Change in Load (amperes) | Duration of Period (minutes) | Time to End of Section (minutes) | Capacity at T Min Rate (6A) Amps / Pos (R <sub>1</sub> ) or (6B) K Factor (K <sub>1</sub> )                                         | Required Section Size (3) + (6A) = Positive Plates or (3) × (6B) = Rated Amp Hrs |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  |                                                                                                                                     | Pos Values Neg Values                                                            |
| Section 1 - First Period Only - If A2 is greater than A1, go to section 2.                      |                                   |                          |                              |                                  |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 1                                                                                               | A1= <u>320</u>                    | A1-0= <u>320</u>         | M1= <u>1</u>                 | T=M1= <u>1</u>                   | <u>75</u>                                                                                                                           | <u>9.27</u> ***                                                                  |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Sec 1                                                                                                                               | Total <u>9.27</u> ***                                                            |
| Section 2 - First Two Periods Only - If A3 is greater than A2, go to section 3.                 |                                   |                          |                              |                                  |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 1                                                                                               | A1=                               | A1-0=                    | M1=                          | T=M1+M2=                         |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 2                                                                                               | A2=                               | A2-A1=                   | M2=                          | T=M2=                            |                                                                                                                                     |                                                                                  |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Sec 2                                                                                                                               | Sub Tot Total ***                                                                |
| Section 3 - First Three Periods Only - If A4 is greater than A3, go to section 4.               |                                   |                          |                              |                                  |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 1                                                                                               | A1= <u>320</u>                    | A1-0= <u>320</u>         | M1= <u>1</u>                 | T=M1+M2+M3= <u>60</u>            | <u>37</u>                                                                                                                           | <u>8.65</u>                                                                      |
| 2                                                                                               | A2= <u>100</u>                    | A2-A1= <u>-220</u>       | M2= <u>29</u>                | T=M2+M3= <u>59</u>               | <u>37</u>                                                                                                                           | <u>-5.95</u>                                                                     |
| 3                                                                                               | A3= <u>280</u>                    | A3-A2= <u>180</u>        | M3= <u>30</u>                | T=M3= <u>30</u>                  | <u>47</u>                                                                                                                           | <u>3.83</u>                                                                      |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Sec 3                                                                                                                               | Sub Tot <u>12.48</u> <u>-5.95</u>                                                |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Total                                                                                                                               | <u>6.53</u> ***                                                                  |
| Section 4 - First Four Periods Only - If A5 is greater than A4, go to section 5.                |                                   |                          |                              |                                  |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 1                                                                                               | A1= <u>320</u>                    | A1-0= <u>320</u>         | M1= <u>1</u>                 | T=M1+... M4= <u>120</u>          | <u>27</u>                                                                                                                           | <u>11.85</u>                                                                     |
| 2                                                                                               | A2= <u>100</u>                    | A2-A1= <u>-220</u>       | M2= <u>29</u>                | T=M2+M3+M4= <u>49</u>            | <u>27</u>                                                                                                                           | <u>-8.15</u>                                                                     |
| 3                                                                                               | A3= <u>280</u>                    | A3-A2= <u>180</u>        | M3= <u>30</u>                | T=M3+M4= <u>90</u>               | <u>29</u>                                                                                                                           | <u>6.21</u>                                                                      |
| 4                                                                                               | A4= <u>200</u>                    | A4-A3= <u>-80</u>        | M4= <u>60</u>                | T=M4= <u>60</u>                  | <u>37</u>                                                                                                                           | <u>-2.16</u>                                                                     |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Sec 4                                                                                                                               | Sub Tot <u>18.06</u> <u>-10.31</u>                                               |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Total                                                                                                                               | <u>7.75</u> ***                                                                  |
| Section 5 - First Five Periods Only - If A6 is greater than A5, go to section 6.                |                                   |                          |                              |                                  |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 1                                                                                               | A1=                               | A1-0=                    | M1=                          | T=M1+... M5=                     |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 2                                                                                               | A2=                               | A2-A1=                   | M2=                          | T=M1+... M5=                     |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 3                                                                                               | A3=                               | A3-A2=                   | M3=                          | T=M3+M4+M5=                      |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 4                                                                                               | A4=                               | A4-A3=                   | M4=                          | T=M4+M5=                         |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 5                                                                                               | A5=                               | A5-A4=                   | M5=                          | T=M5=                            |                                                                                                                                     |                                                                                  |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Sec 5                                                                                                                               | Sub Tot Total ***                                                                |
| Section 6 - First Six Periods Only - If A7 is greater than A6, go to section 7.                 |                                   |                          |                              |                                  |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 1                                                                                               | A1= <u>320</u>                    | A1-0= <u>320</u>         | M1= <u>1</u>                 | T=M1+... M6= <u>180</u>          | <u>19</u>                                                                                                                           | <u>16.84</u>                                                                     |
| 2                                                                                               | A2= <u>100</u>                    | A2-A1= <u>-220</u>       | M2= <u>29</u>                | T=M1+... M6= <u>179</u>          | <u>19</u>                                                                                                                           | <u>-11.58</u>                                                                    |
| 3                                                                                               | A3= <u>280</u>                    | A3-A2= <u>180</u>        | M3= <u>30</u>                | T=M1+... M6= <u>180</u>          | <u>23</u>                                                                                                                           | <u>7.83</u>                                                                      |
| 4                                                                                               | A4= <u>200</u>                    | A4-A3= <u>-80</u>        | M4= <u>60</u>                | T=M4+M5+M6= <u>120</u>           | <u>27</u>                                                                                                                           | <u>-2.96</u>                                                                     |
| 5                                                                                               | A5= <u>40</u>                     | A5-A4= <u>-160</u>       | M5= <u>59</u>                | T=M5+M6= <u>60</u>               | <u>37</u>                                                                                                                           | <u>-4.32</u>                                                                     |
| 6                                                                                               | A6= <u>120</u>                    | A6-A5= <u>80</u>         | M6= <u>1</u>                 | T=M6= <u>1</u>                   | <u>75</u>                                                                                                                           | <u>1.07</u>                                                                      |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Sec 6                                                                                                                               | Sub Tot <u>25.74</u> <u>-18.86</u>                                               |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Total                                                                                                                               | <u>6.88</u> ***                                                                  |
| Section 7 - First Seven Periods Only - If A8 is greater than A7, go to section 8.               |                                   |                          |                              |                                  |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 1                                                                                               | A1=                               | A1-0=                    | M1=                          | T=M1+... M7=                     |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 2                                                                                               | A2=                               | A2-A1=                   | M2=                          | T=M1+... M7=                     |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 3                                                                                               | A3=                               | A3-A2=                   | M3=                          | T=M1+... M7=                     |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 4                                                                                               | A4=                               | A4-A3=                   | M4=                          | T=M1+... M7=                     |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 5                                                                                               | A5=                               | A5-A4=                   | M5=                          | T=M5+M6+M7=                      |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 6                                                                                               | A6=                               | A6-A5=                   | M6=                          | T=M6+M7=                         |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| 7                                                                                               | A7=                               | A7-A6=                   | M7=                          | T=M7=                            |                                                                                                                                     |                                                                                  |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Sec 7                                                                                                                               | Sub Tot Total ***                                                                |
| Random Equipment Load Only (if needed)                                                          |                                   |                          |                              |                                  |                                                                                                                                     |                                                                                  |
| R                                                                                               | AR= <u>100</u>                    | AR-0= <u>100</u>         | MR= <u>1</u>                 | T=MR= <u>1</u>                   | <u>75</u>                                                                                                                           | <u>1.33</u> ***                                                                  |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Maximum Section Size (8) <u>7.75</u> + Random Section Size (9) <u>1.33</u> = Uncorrected Size - (US) (10) <u>9.08</u>               |                                                                                  |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | US (11) <u>9.08</u> × Temp Corr (12) <u>1.08</u> × Design Marg (13) <u>1.15</u> × Aging Factor (14) <u>1.25</u> = (15) <u>14.10</u> |                                                                                  |
| When the cell size (15) is greater than a standard cell size, the next larger cell is required. |                                   |                          |                              |                                  |                                                                                                                                     |                                                                                  |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | (A) - Positive Plates.                                                                                                              |                                                                                  |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Required cell size (16) <u>15</u>                                                                                                   |                                                                                  |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | (B) - Ampere Hours.                                                                                                                 |                                                                                  |
|                                                                                                 |                                   |                          |                              |                                  | Therefore cell (17) <u>XY2</u> is required.                                                                                         |                                                                                  |

Nota: Registro y cálculo de la ilustración 59, extraída de "IEEE std 485-2020".

## Características complementarias y recomendaciones para especificaciones.

### Bancos de baterías

Un banco con la cantidad y características eléctricas requeridas para alimentar las cargas de servicios propios durante un lapso de 8 horas cuando por algún motivo se interrumpa el servicio a través de los cargadores.

#### Requisitos que deben cumplir dichas baterías

- Las terminales de las baterías deberán ser de plomo para el caso de las baterías tipo plomo-ácido y de hierro niquelado cuando se trate de baterías alcalinas.
- Las terminales deben de tener la capacidad de conducir la corriente máxima que puede llegar a manejar en la celda de acuerdo a su capacidad y para las condiciones de descarga.
- Las barras de interconexión entre baterías o celdas deberán ser de cobre electrolítico, las cuales deben de tener la capacidad de conducir la máxima corriente de descarga durante el tiempo de régimen de descarga durante el tiempo de régimen sin que se presente sobre calentamiento.

### Cargadores de baterías

Los principales requisitos que deben cumplir los cargadores de baterías que deben utilizarse para alimentar los equipos de servicios propios en corriente directa de las subestaciones eléctricas son los siguientes:

- Deberán estar diseñados para servicio interior y contenidos en gabinetes metálicos auto soportados.

- Todo cargador deberá estar dotado de equipo de protección contra fallas eléctricas tanto a la entrada como a la salida del mismo.
- Deberá estar provisto, asimismo, del equipo necesario tanto para medición y ajuste como para señalización y alarma en caso de fallas, se deberá presentar el siguiente equipo:
  - i) Voltímetro y amperímetro en la entrada y salida.
  - ii) Potenciómetros para ajuste de voltajes de igualación y flotación.
  - iii) Reloj manual para el control de la carga de igualación.
  - iv) Relevadores para detección de baja y alta tensión a la salida con indicador visual.
  - v) Lámparas piloto para señalización de falla a tierra con interruptor de prueba.
  - vi) Lámparas piloto para señalización de flotación y sobrecarga.
  - vii) Tablillas terminales suficientes para cables de control y señalización remota.

## Cálculos de la red de tierra

En esta sección se calcularán las dimensiones de la malla de tierra y se definirán las características de los elementos de la instalación.

*Tabla 9. Datos relevantes de línea y de red para cálculo de tierra*

| Datos de partida                      |        |          |
|---------------------------------------|--------|----------|
| Datos generales                       | Línea  | Red      |
| Frecuencia nominal (hz)               | 60     | 60       |
| Temperatura ambiente (celsius)        | 25     | 25       |
| Tiempo de despeje de falla (seg)      | 0.5    | 0.5      |
| Nivel de tensión (kV)                 | 13.8   | 138/13.8 |
| Nivel en que se calcula la falla (kV) | 13.8   | 138/13.8 |
| Corriente de cortocircuito (kA)       | 10.129 | 306750   |

*Nota:* Elaboración propia, elementos resaltados son más relevantes.

Tabla 10. Datos de partidas del terreno

| Datos de partida              |                  |                 |                 |
|-------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Datos de terreno              | Capa superficial | Primera capa    | Segunda capa    |
| Tipo de material              | Hormigón         | Arena arcillosa | Calizas blandas |
| Espesor de la capa (mts)      | 0.2              | 2               | 100             |
| Resistividad ( $\Omega$ /mts) | 3000             | 60              | 350             |

Nota: Elaboración propia

## Datos geométricos de la subestación.

En el cálculo se considerarán las dimensiones de la planta ampliadas en 1 metro para abarcar toda la zona comprendida por la subestación y los accesos a la misma.

Tabla 11. Datos de las dimensiones a considerar del terreno que abarcara la subestación.

| Datos geométricos de la subestación |     |
|-------------------------------------|-----|
| Lado mayor de la malla (mts)        | 36  |
| Lado menor de la malla (mts)        | 18  |
| Profundidad de la malla (mts)       | 1   |
| Lado de la cuadrícula (mts)         | 1.5 |

Nota: Elaboración propia.

## TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO

De acuerdo con las normas IEC, se define la tensión de paso como la diferencia de potencial entre los puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso (1 m) en la dirección del gradiente de potencial máximo. De forma similar, se define la tensión de contacto como la diferencia de potencial entre la estructura metálica puesta tierra y el punto de la superficie del terreno a una distancia de 1 m en la dirección del gradiente de potencial máximo.

En el cálculo de la puesta tierra es fundamental conocer la tensión a la que se vería sometida una persona si estuviese en la instalación en el momento de producirse una falta a tierra. La persona constituye un divisor de potencial entre todas las resistencias intervienen en el

circuito de forma que el sujeto no queda sometido a la totalidad de la tensión de paso o contacto existente la instalación sino a una fracción de la misma, que constituye la denominada tensión de paso o contacto aplicada.

La tensión de paso aplicada es la fracción de la intensidad de la tensión de paso que resulta directamente aplicable los pies de un hombre, estimándose la resistencia del cuerpo humano en 1000 ohmios.

Por otra parte, la tensión de contacto aplicada es la tensión que resulta directamente aplicable: el cuerpo humano, estimando nuevamente la resistencia del cuerpo humano en 1000 ohmios.

Las tensiones de paso y de contacto aplicadas establecen un límite máximo de tensión, que en todos los casos se debe garantizar que no supere los niveles máximos de tensión de paso y de contacto calculados empleando las relaciones que se detallan en el apartado siguiente.

### **Aplicación de metodología de puesta a tierra MIE-RAT 13 e IEEE std 80-2000**

Las tensiones de paso y de contacto deben ser comparadas con las tensiones de paso y de contacto admisibles, respectivamente, para justificar la validez de la instalación de puesta a tierra.

Dado que el tiempo de despeje de la falta es inferior a 0.9 segundos, los valores de los parámetros  $K$  y  $n$  en las expresiones anteriores serán  $K = 72$  y  $n = 1$

$$E_s = V_p = \frac{10 * 72}{0.5^1} \left( 1 + \frac{6 * 3000}{1000} \right) = 27360 \text{ v}$$

*Ecuación 32*

$$E_m = V_c = \frac{72}{0.5^1} \left( 1 + \frac{1.5 * 3000}{1000} \right) = 792 \text{ v}$$

*Ecuación 31*

$$S_{min} = \frac{10.129 * 1000 \text{ amp}}{160 \left( \frac{\text{Amp}}{\text{mm}^2} \right)} = 63.30625 \text{ mm}^2$$

*Ecuación 30*

Con el fin de que la sección mínima del conductor no esté tan comprometida se dará un factor de seguridad de 15% dando como resultado en la selección del conductor 3/0 o 95 mm<sup>2</sup>

$$d = 2 \sqrt{\frac{120}{\pi}} = 12.36077446 \text{ mm}$$

*Ecuación 29*

Donde L representa la longitud total de conductores en metros, y L', la longitud total de las picas, en metros.

$$i = \frac{10.129 * 1000}{864} \left( \frac{\text{Amp}}{\text{Mts}} \right) = 11.72337963 \frac{\text{amp}}{\text{mts}}$$

*Ecuación 33*

El radio r es el radio del círculo de igual superficie que el área cubierta por la malla.

$$r = \sqrt{\frac{36 * 18}{\pi}} = 14.36192209 \text{ mts}$$

*Ecuación 34*

La resistencia de puesta a tierra total se obtiene como la suma de resistencias de los conductores de cobre, de las picas y la conductancia equivalente a un anillo que cubre la misma superficie que el área cubierta por la malla.

$$R_g = R_{pat} = \frac{60}{4 * 14.36192209} + \frac{60}{864} = 1.113872893 \Omega$$

*Ecuación 35*

Considerando que la malla está enterrada en la primera capa de suelo, las fórmulas empleadas para calcular las tensiones de paso y de contacto serán, respectivamente:

$$V_{p1} = 0.366 * 60 * 11.72337963 * \log \left( \frac{\left(\frac{1.5}{2}\right)^2 + 1^2}{1^2} \right) = 49.89807736 \text{ v} \quad \text{Ecuación 37}$$

$$V_{c1} = 0.366 * 60 * 11.72337963 * \log \left( \frac{(1.5^2 + 4 * 1^3)^{\frac{3}{2}}}{16 * 0.012360774 * 1 * 1.5} \right)$$

$$= 443.2085343 \text{ v} \quad \text{Ecuación 36}$$

## Resultados

Realizando el proceso descrito en el apartado “Metodología de cálculo de la red de tierras”, se obtienen los resultados que se detallan en esta sección.

Tabla 12. Resultados de cálculos de red a tierra MIE-RAT 13

| Símbolo | Descripción                                     | Resultados          |
|---------|-------------------------------------------------|---------------------|
| S       | Sección normalizada de los conductores de cobre | 120 mm <sup>2</sup> |
| D       | Lado de la cuadrícula de la malla               | 1.5 mts             |
| N       | Numero de picas o varillas a tierra             | 0                   |
| L       | Longitud total de conductores                   | 864 mts             |

|                                   |                                                  |               |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|---------------|
| R <sub>pat</sub> o R <sub>g</sub> | Resistencia de puesta a tierra de la instalación | 1.113872893 Ω |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|---------------|

Las tensiones de paso y de contacto de la instalación se reflejan en la siguiente tabla. Se comprueba que los valores calculados con la red de tierras diseñada no sobrepasan las tensiones admisibles.

Tabla 13. Tabulación comparativa entre tensiones admisibles y aplicadas.

| Tipo de tensión     | Aplicada (V) | Admisible (V) |
|---------------------|--------------|---------------|
| Tensión de paso     | 49.89807736  | 27360         |
| Tensión de contacto | 443.2085343  | 792           |

No obstante, es recomendable medir de forma práctica los valores de las tensiones de paso y contacto, una vez construida la subestación, para asegurarse de que no existe peligro en ningún punto de la instalación.

Ahora se utilizará las normativas de la IEEE 80-2000, a partir de unos valores de resistividad del terreno a la profundidad de enterramiento de la malla y de la intensidad de tierra, las cuales son determinadas por esta normativa por expresiones empíricas.

$$E_m = \frac{\rho * K_m * K_i * I_g}{L_m} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$K_m = \frac{1}{2 * \pi} * \left[ \ln \frac{D^2}{16 * h * d} + \frac{(D + 2 * h)^2}{8 * D * d} - \frac{h}{4 * d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} * \left[ \ln \frac{8}{\pi(2 * n - 1)} \right] \quad \text{Ecuación 38}$$

Para mallas con varillas de tierra a lo largo del perímetro, o para las rejillas con varillas de tierra en las esquinas de la malla, así como a lo largo del perímetro y en toda el área de la cuadrícula.  $K_{ii} = 1$ .

Para las mallas sin barras o mallas con sólo unas pocas varillas de tierra, o ninguna ubicadas en las esquinas o en el perímetro.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^{\frac{2}{n}}} \quad \text{Ecuación 42}$$

$$K_h = \sqrt[2]{1 + \frac{h}{h_o}} \quad h_o = 1 \text{ mts (profundidad de referencia de cuadrícula)} \quad \text{Ecuación 41}$$

$$E_m = \frac{\rho * K_m * K_i * I_g}{L_m} \quad \text{Ecuación 40}$$

Utilizando los componentes de cuatro formas de cuadrículas desarrollados en Thapar, Gerez, Balakrishnan, y en Blank, el número efectivo de conductores paralelos en una red dada, n, puede ser aplicable a rejillas rectangulares o en forma irregular que representen el número de conductores en paralelo de una cuadrícula rectangular equivalente.

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d \quad \text{Ecuación 43}$$

Donde

$$n_a = \frac{2 * L_c}{L_p} \quad \text{Ecuación 44}$$

$n_b = 1$  para mallas cuadradas

$n_c = 1$  para las mallas cuadradas y rectangulares

$n_d = 1$  para las mallas cuadradas, rectangulares y en forma de L en otros casos

$$n_b = \sqrt[2]{\frac{L_p}{4 * \sqrt[2]{A}}} \quad \text{Ecuación 45}$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x * L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 * A}{L_x * L_y}} \quad \text{Ecuación 48}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt[2]{L_x^2 + L_y^2}} \quad \text{Ecuación 47}$$

El factor de irregularidad,  $K_i$ , usado en conjunción con la  $n$  definida anteriormente es

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad \text{Ecuación 46}$$

Para las redes sin varillas de tierra, o con sólo pocas varillas de tierra dispersos en toda la red, pero ninguno de ellos situados en las esquinas o en el perímetro de la red, la longitud efectiva enterrada,  $L_M$ , es

$$L_M = L_C + L_R \quad \text{Ecuación 50}$$

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 * \left( \frac{L_r}{\sqrt[2]{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] * L_R \quad \text{Ecuación 49}$$

Tensión de paso ( $E_s$ )

Los valores de tensión de paso se obtienen como producto del factor geométrico,  $K_s$ ; el factor de corrección,  $K_i$ , la resistividad del suelo,  $\rho$ , y la corriente media por unidad de longitud del conductor de tierra enterrado del sistema ( $I_G / L_S$ ).

$$E_s = \frac{\rho * K_s * K_i * I_G}{L_S} \quad \text{Ecuación 51}$$

Para las redes con o sin varillas de tierra, la longitud efectiva del conductor enterrado,  $L_S$ , es

$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R \quad \text{Ecuación 52}$$

La máxima tensión de paso se supone que ocurre a una distancia de 1 m, comienza y se extiende al exterior del perímetro del conductor en la bisectriz del ángulo de la esquina más extrema de la malla. Para la profundidad de enterramiento habitual de 0,25 m < h < 2,5 m (Sverak [B132]),  $K_s$  es

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad \text{Ecuación 53}$$

A partir de los datos preliminares y los voltajes de paso y toque admisible de acuerdo a MIE-RAT 13 se calculará ciertos valores para permitirse utilizar las formulas de la IEEE 80-2000 que introduce factores de corrección debido a una posible irregularidad en el diseño geométrico del sistema de puesta a tierra

Debido a que no se dispone de varillas de tierra en la malla resulta que  $L_T$  y  $L_C$  son iguales

$$L_T = L_C = (36 * 12) \text{ mts} + (18 * 24) \text{ mts} = (432 + 432) \text{ mts} = 864 \text{ mts} \quad \text{Ecuación 57}$$

$$A = 18 \text{ mts} * 36 \text{ mts} = 648 \text{ mts}^2 \quad \text{Ecuación 56}$$

$$n_a = \frac{2 * L_c}{L_p} = \frac{2 * 864 \text{ mts}}{(36 * 2 + 18 * 2) \text{ mts}} = 16 \quad \text{Ecuación 55}$$

$$n_b = \sqrt[2]{\frac{L_p}{4 * \sqrt[2]{A}}} = \sqrt[2]{\frac{(36 * 2 + 18 * 2) \text{ mts}}{4 * \sqrt[2]{864}}} = \sqrt[2]{\frac{108}{4 * \sqrt[2]{864}}} = 0.958414656 \quad \text{Ecuación 54}$$

Debido a que la malla es rectangular los factores de corrección  $n_c$  y  $n_d$  se igualarían a 1

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d = 16 * 0.958414656 * 1 * 1 = 15.3346345 \quad \text{Ecuación 58}$$

Debido a que este diseño preliminar no dispone de varilla de tierra es necesario calcular  $k_{ii}$ , como sigue:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^{\frac{2}{n}}} = \frac{1}{(2 * 15.3346345)^{\frac{2}{15.3346345}}} = 1.562792736 \quad \text{Ecuación 60}$$

Se dispondrá a calcular  $k_h$ , como sigue:

$$K_h = \sqrt[2]{1 + \frac{h}{h_o}} = \sqrt[2]{1 + \frac{1}{1}} = 1.414213562 \quad \text{Ecuación 59}$$

Se calculará el factor de corrección  $k_m$  (factor de espaciado para voltaje de malla), como sigue:

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{1}{2 * \pi} * \left[ \ln \frac{1.5^2}{16 * 1 * 0.0061803872} + \frac{(1.5 + 2 * 1)^2}{8 * 1.5 * 0.0061803872} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{4 * 0.0061803872} \right] + \frac{1.562792736}{1.414213562} * \left[ \ln \frac{8}{\pi(2 * 15.3346345 - 1)} \right] \\ &= \frac{1}{2 * \pi} * \ln[22.75342878 + 165.1730386 - 40.45054006] \\ &\quad + 1.105061342 * [\ln 0.085828844] \\ &= \frac{1}{2 * \pi} * \ln 147.4759273 - 2.539744764 = -1.91860132 \quad \text{Ecuación 61} \end{aligned}$$

Luego se calcula el factor de corrección  $k_i$  (factor de corrección para geometría de malla).se realiza como sigue:

$$K_i = 0.644 + 0.148 * 15.3346345 = 2.913525906 \quad \text{Ecuación 64}$$

$$E_m = \frac{\rho * K_m * K_i * I_g}{L_m} = \frac{60 * -1.92 * 1.563 * 1283.35}{864} = -267.45014 \text{ v} \quad \text{Ecuación 63}$$

$$L_s = 0.75L_c + 0.85L_R = 0.75 * 1540 + 0.85 * 0 = 1155 \quad \text{Ecuación 62}$$

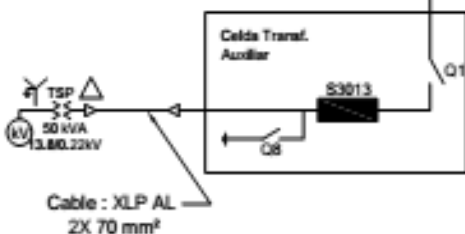
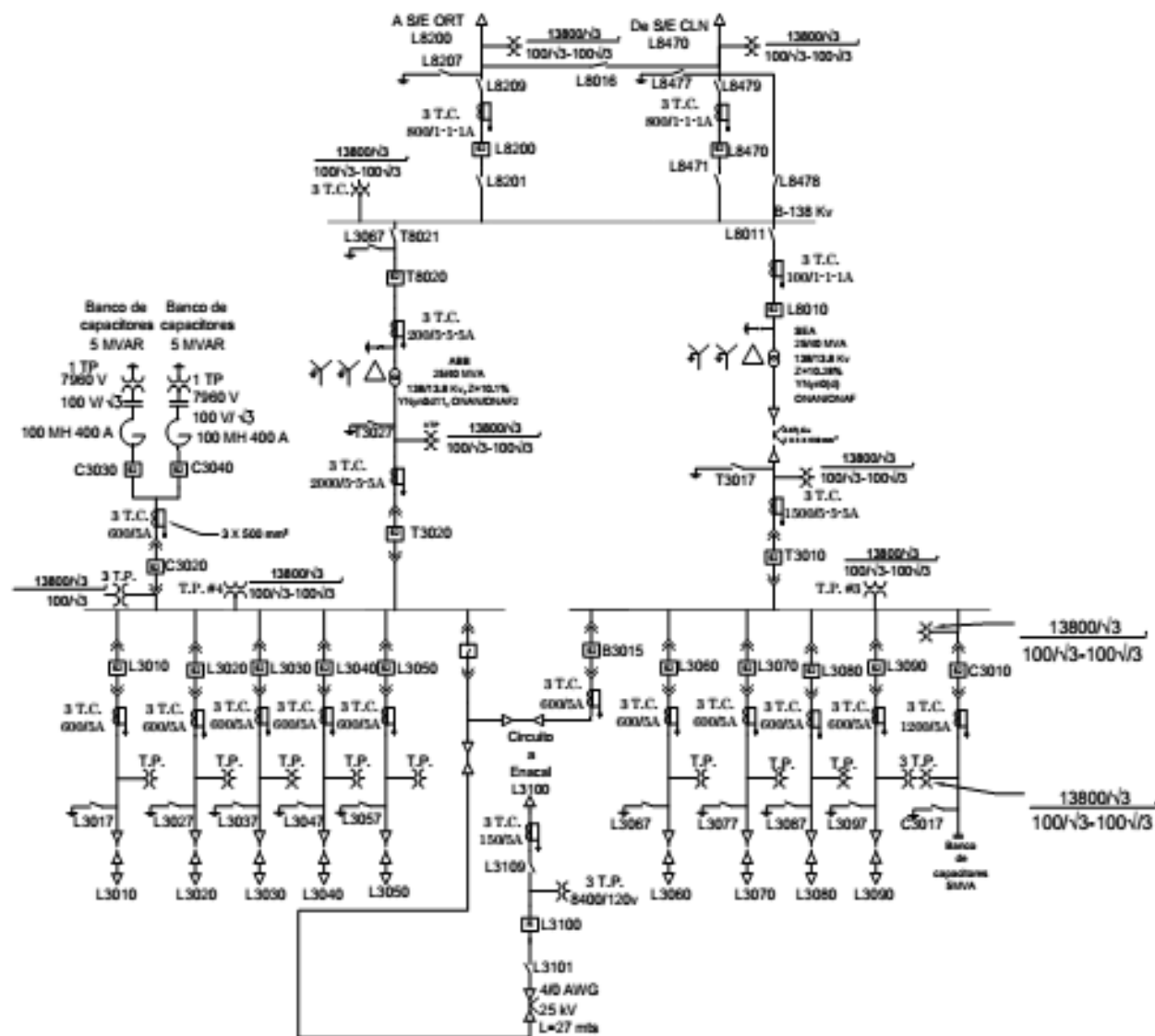
$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 * 1} + \frac{1}{1.5 + 1} + \frac{1}{1.5} (1 - 0.5^{15.335-2}) \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} [0.5 + 0.4 + 0.667(0.999903224)] = 0.498771045 \quad \text{Ecuación 66}$$

$$E_s = \frac{\rho * K_s * K_i * I_G}{L_S} = \frac{60 * 0.498771045 * 2.913525906 * 1283.35}{1155}$$

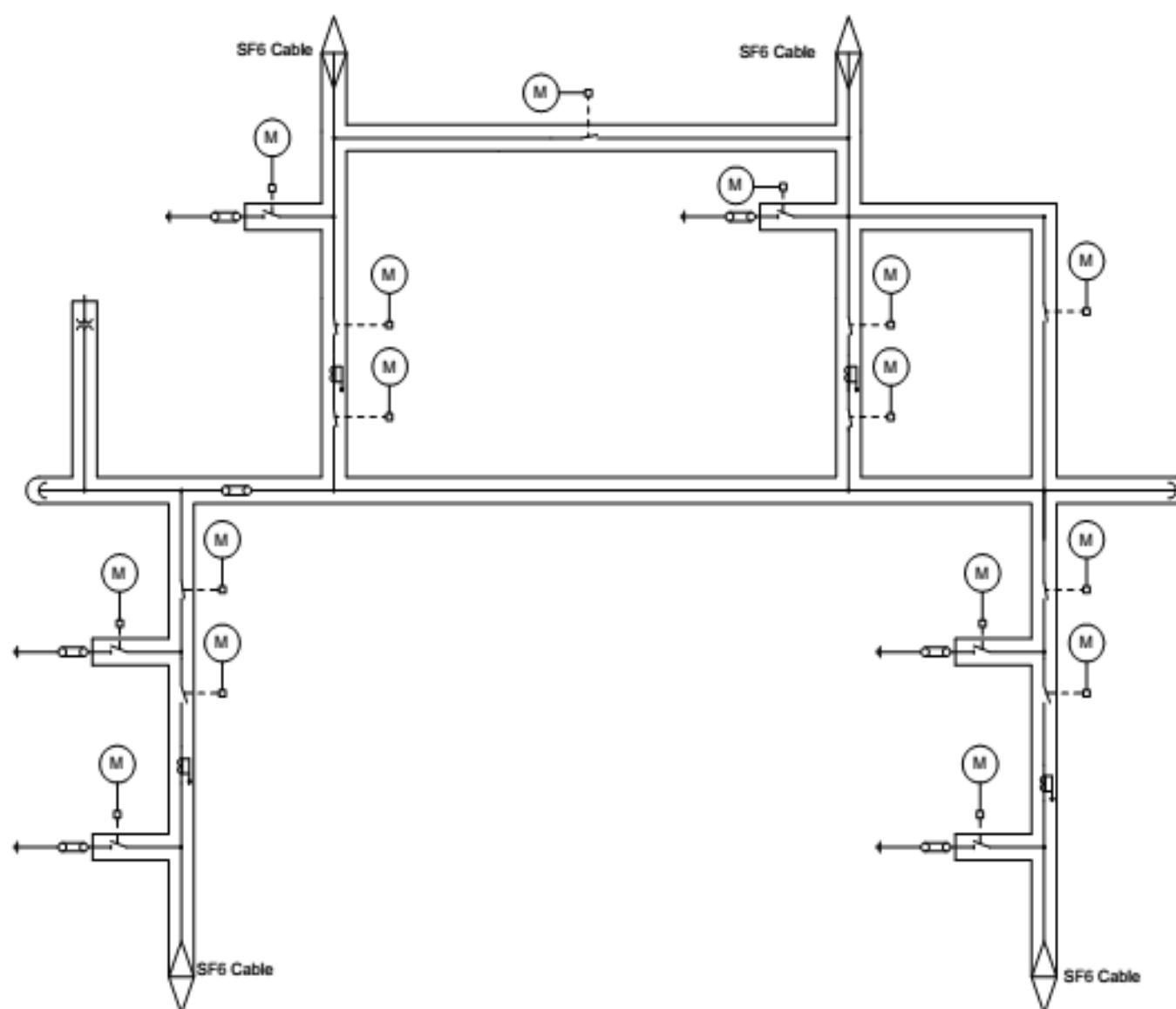
$$= 96.8800822 \, v \quad \text{Ecuación 65}$$

## Planos

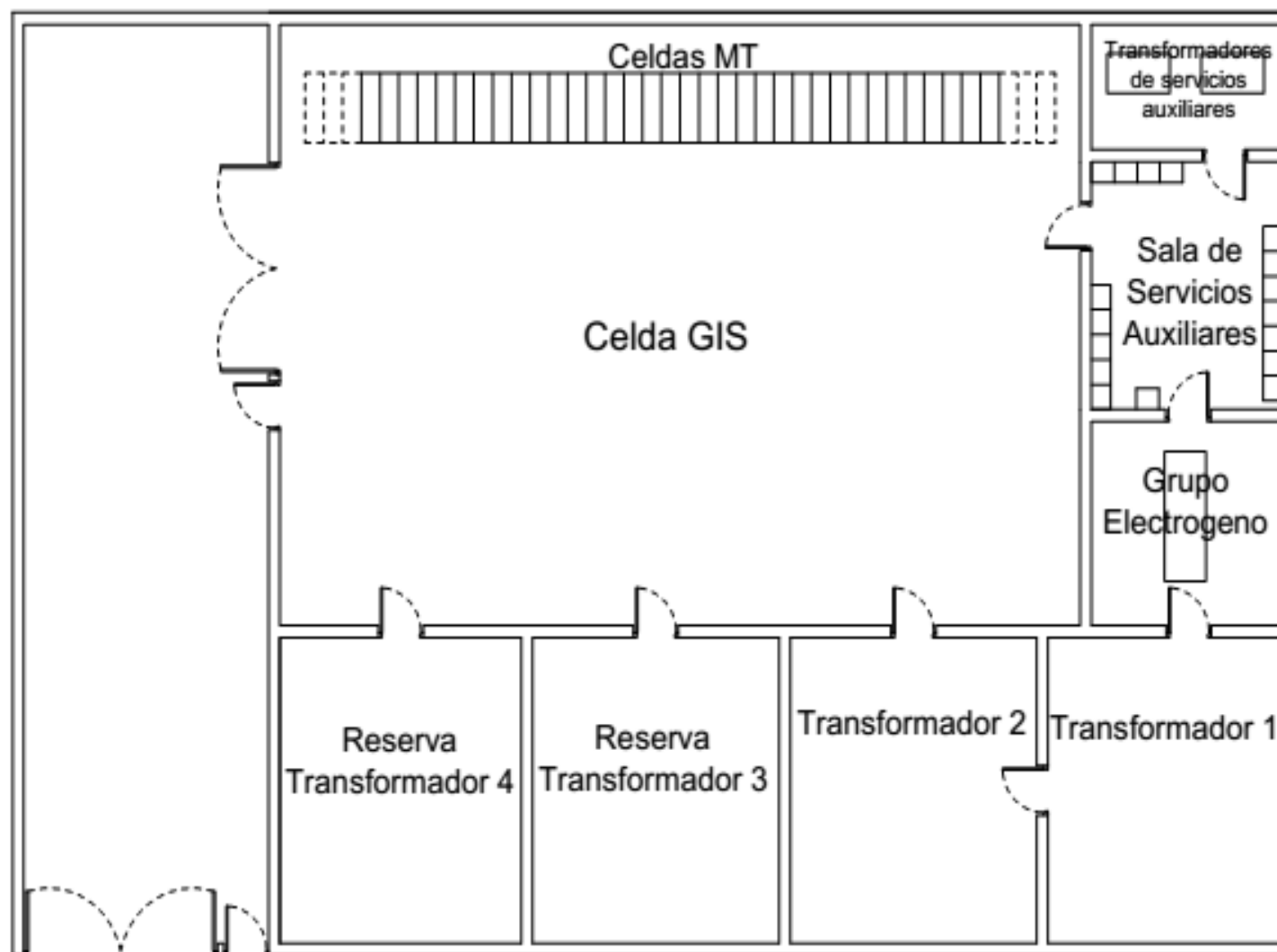


|                                                                                     |                                                        |                         |       |                                       |                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|-------|---------------------------------------|---------------------|
|                                                                                     | Fecha                                                  | Nombre                  | Firma | Universidad Nacional<br>de Ingeniería | Formato<br><br>A 4  |
| Dibujado                                                                            | 25/05/24                                               | Br. Pedro Mendoza       |       |                                       |                     |
|                                                                                     |                                                        | Br. Aljady Fuentes      |       |                                       |                     |
| Comprobado                                                                          | 27/05/24                                               | Msc. Pedro Perez Orozco |       |                                       |                     |
| Escala<br><br>1:150                                                                 | Proyecto<br><br>Transferencia tecnologica de AIS a GIS |                         |       |                                       |                     |
|  | Plano<br><br>Plano de Planta                           |                         |       |                                       | Plano No<br><br>1/5 |

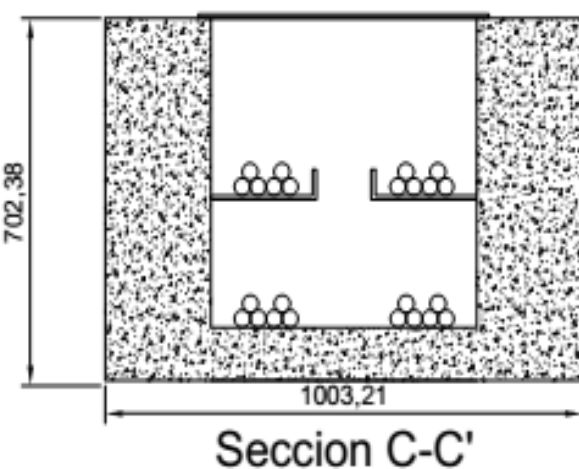
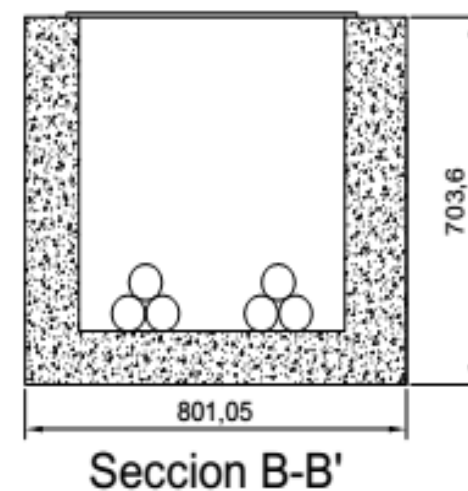
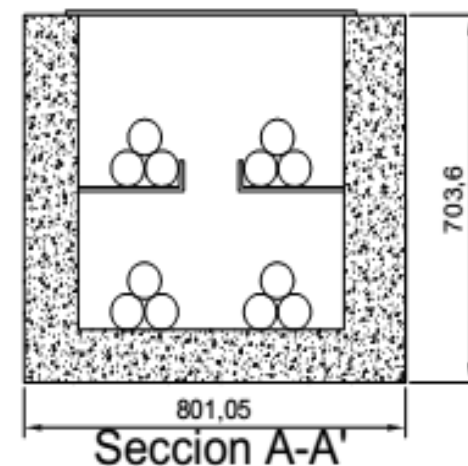
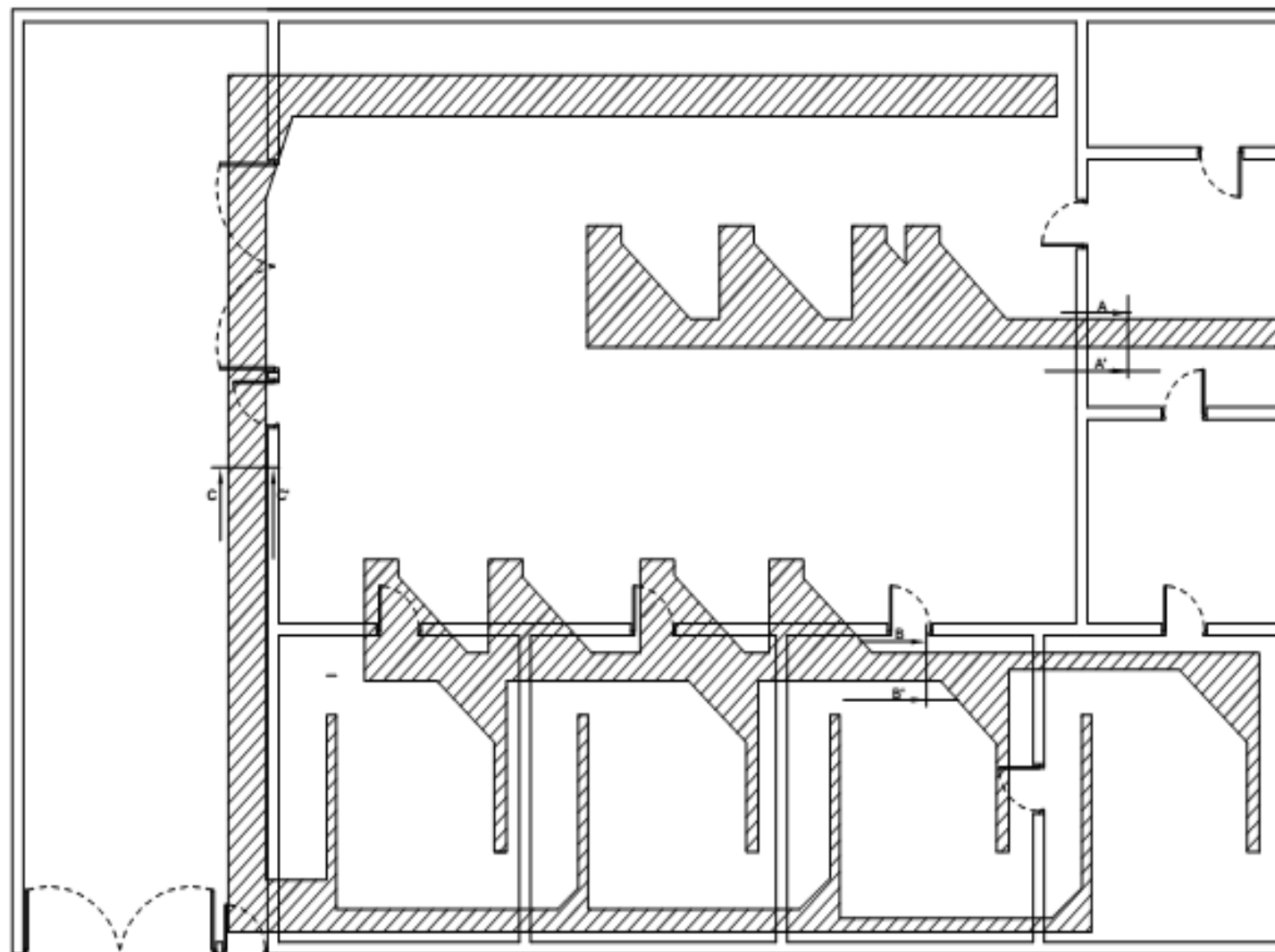




|                                                                                     |                                                    |                         |       |                                       |                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|-------|---------------------------------------|-----------------|
|                                                                                     | Fecha                                              | Nombre                  | Firma | Universidad Nacional<br>de Ingeniería | Formato         |
| Dibujado                                                                            | 25/05/24                                           | Br. Pedro Mendoza       |       |                                       | A 4             |
|                                                                                     |                                                    | Br. Aljady Fuentes      |       |                                       |                 |
| Comprobado                                                                          | 27/05/24                                           | Msc. Pedro Perez Orozco |       |                                       |                 |
| Escala<br>1:150                                                                     | Proyecto<br>Transferencia tecnologica de AIS a GIS |                         |       |                                       |                 |
|  | Plano<br>Esquema de Compartimiento de 138 kV       |                         |       |                                       | Plano No<br>2/5 |



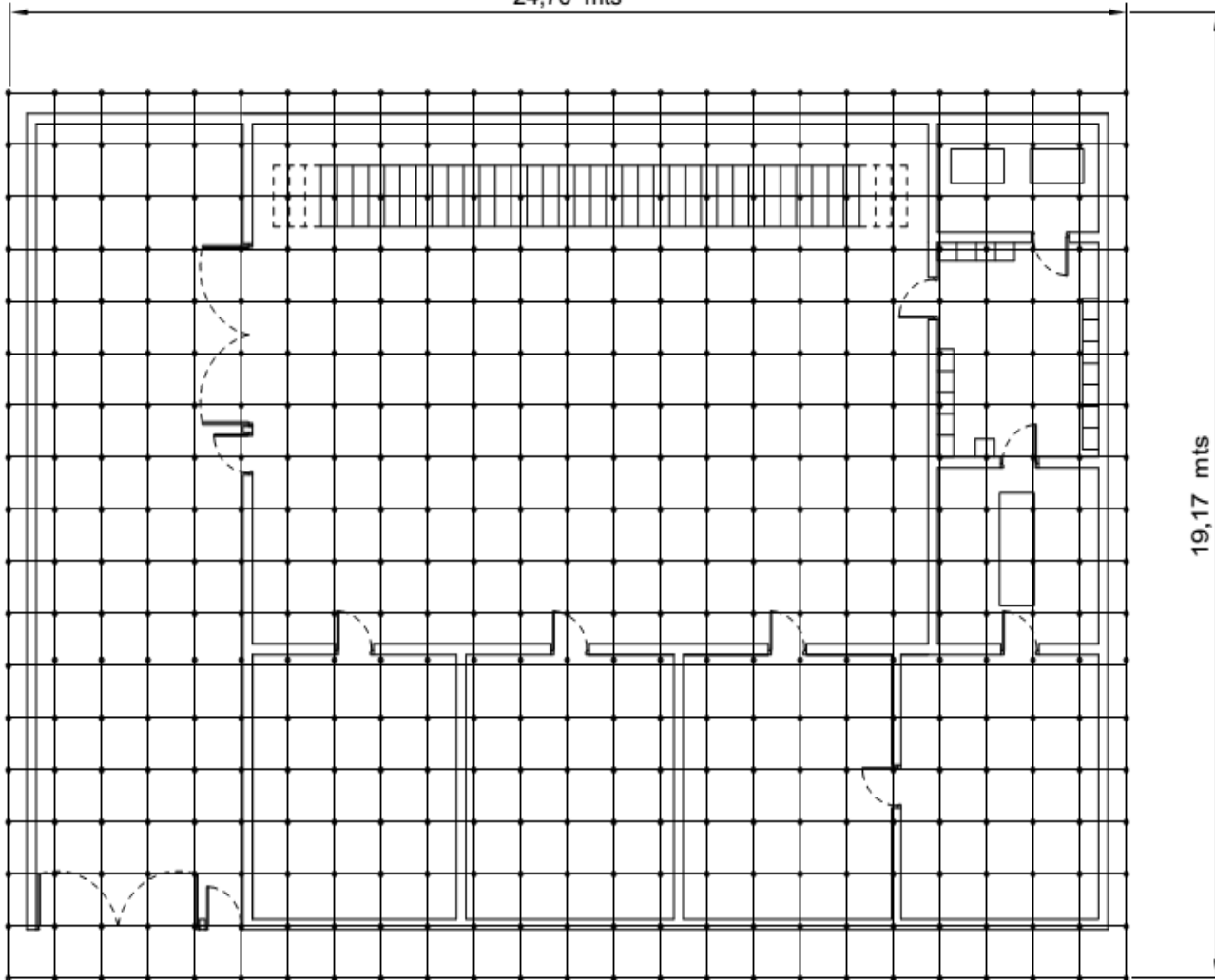
|                                                                                     |                                                    |                         |       |                                       |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|-------|---------------------------------------|---------|
|                                                                                     | Fecha                                              | Nombre                  | Firma | Universidad Nacional<br>de Ingeniería | Formato |
| Dibujado                                                                            | 25/05/24                                           | Br. Pedro Mendoza       |       |                                       | A 4     |
|                                                                                     |                                                    | Br. Aljady Fuentes      |       |                                       |         |
| Comprobado                                                                          | 27/05/24                                           | Msc. Pedro Perez Orozco |       |                                       |         |
| Escala<br>1:150                                                                     | Proyecto<br>Transferencia tecnologica de AIS a GIS |                         |       |                                       |         |
|  | Plano<br>Plano de Planta                           |                         |       | Plano No<br>3/5                       |         |



|            | Fecha    | Nombre                                 | Firma | Universidad Nacional<br>de Ingeniería | Formato  |
|------------|----------|----------------------------------------|-------|---------------------------------------|----------|
| Dibujado   | 25/05/24 | Br. Pedro Mendoza                      |       |                                       | A 4      |
|            |          | Br. Aljady Fuentes                     |       |                                       |          |
| Comprobado | 27/05/24 | Msc. Pedro Perez Orozco                |       |                                       |          |
| Escala     | Proyecto | Transferencia tecnologica de AIS a GIS |       |                                       |          |
| 1:150      |          |                                        |       |                                       |          |
|            | Plano    | Canalizaciones AT - MT                 |       |                                       | Plano No |
|            |          |                                        |       |                                       | 4/5      |



24,76 mts



19,17 mts

| Relación de materiales necesarios para el montaje |         |                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cant.                                             | Símbolo | Denominación                                                                                                      |
| —                                                 | —       | Cable Cu. Desnudo de 240 mm <sup>2</sup> enterrado a 1 mts de profundidad                                         |
|                                                   | ⊥       | Soldadura aluminotermica en T para cable pasante Cu. de 240 mm <sup>2</sup> a cable Cu. de 240 mm <sup>2</sup>    |
|                                                   | +       | Soldadura aluminotermica en cruz para cable pasante Cu. de 240 mm <sup>2</sup> a cable Cu. de 240 mm <sup>2</sup> |

| Tipo de conexion   | Croquis |
|--------------------|---------|
| Exotermica en "T"  |         |
| Exotermica en cruz |         |

|                                                                                     |                                                    |                         |       |                                       |                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|-------|---------------------------------------|-----------------|
|                                                                                     | Fecha                                              | Nombre                  | Firma | Universidad Nacional<br>de Ingeniería | Formato         |
| Dibujado                                                                            | 25/05/24                                           | Br. Pedro Mendoza       |       |                                       | A 4             |
|                                                                                     |                                                    | Br. Aljady Fuentes      |       |                                       |                 |
| Comprobado                                                                          | 27/05/24                                           | Msc. Pedro Perez Orozco |       |                                       |                 |
| Escala<br>1:150                                                                     | Proyecto<br>Transferencia tecnologica de AIS a GIS |                         |       |                                       |                 |
|  | Plano<br>Red de Tierras                            |                         |       |                                       | Plano No<br>5/5 |