UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
VALPARAÍSO - CHILE

MODELO DE MANTENIMIENTO PARA AISLADORES CONTAMINADOS EN LA LÍNEA 220 KV CÓNDORES - PARINACOTA

CRISTIAN DAVID SILVA PACHECO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

PROFESORES GUÍAS JORGE ARDILA
DAVID GODOY
ROGER SCHURCH

OCTUBRE - 2018

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
VALPARAÍSO - CHILE

MODELO DE MANTENIMIENTO PARA AISLADORES CONTAMINADOS EN LA LÍNEA 220 KV CÓNDORES - PARINACOTA

CRISTIAN DAVID SILVA PACHECO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

PROFESORES GUÍAS	JORGE ARDILA
	DAVID GODOY
	ROGER SCHURCH
CORREFERENTE	MARCELO URIBE

OCTUBRE - 2018

"Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución"

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, María Inés y Miguel, por su amor y apoyo incondicional. Ustedes han sido los pilares de todos los pequeños y grandes logros que mi hermano y yo hemos tenido. Por sus consejos sabios, por su cariño a toda prueba, por enseñarme en base a ejemplos el valor del esfuerzo, por su preocupación constante, por no soltar jamás mi mano en los momentos en lo que lo necesité y por el hecho de hacer de mi lo que soy hoy y lo que seré mañana...
Gracias papás!

A Javier, mi hermano, por ayudarme a formar mi carácter y por ser al mismo tiempo mi amigo y consejero. Me has ayudado mucho en los últimos años y debes saber que cuentas conmigo para todo.
Gracias hermano!

A mis amigos por los baciles y por las conversaciones largas en donde arreglamos el mundo un problema a la vez.
Gracias cabros!

Por último, gracias a mis profesores por ayudarme en este proceso y por hacer esta memoria posible

Abstract

Las líneas de transmisión en el norte de Chile recorren distancias vastas para conectar los distintos consumos eléctricos de esta zona del país. Las distancias y las características ambientales, como la alta concentración salina y de otros agentes contaminantes producidos por el clima desértico, la cercanía al mar y la prácticamente nula presencia de lluvias, generan un desafío para el mantenimiento de los distintos componentes del sistema de transmisión nortino. En particular, los aisladores deben ser lavados constantemente para asegurar su correcto funcionamiento y evitar descargas a tierra. En la línea 1x220 kV Cóndores – Parinacota, propiedad de Transelec, una falla como esta en cualquiera de las 524 estructuras que la componen a lo largo de sus 222 km, significa la desconexión del consumo regulado de toda la ciudad de Arica al no contar con una redundancia en paralelo.

La logística para el mantenimiento es compleja. Existen quebradas de difícil acceso, dificultad de maniobra para los camiones aljibes encargados de llevar el agua, los materiales y el personal para el lavado de los aisladores, la extensión de la línea es muy larga lo que obliga a separarla en diferentes secciones dependiendo de la severidad de la contaminación y el costo es elevado para recursos que son siempre escasos. Por todo esto, se ha planteado la necesidad de revisar los planes de mantenimiento aplicados y las periodicidades con el fin de confirmar la validez del actual modelo o, por el contrario, proponer modificaciones que ayuden a optimizar los costos dependiendo de las necesidades de mantenimiento.

Para realizar este trabajo se analizan la calidad y cantidad de datos que posee Transelec para trabajar sobre una propuesta de mantenimiento que permita una comparación con el trabajo que actualmente se hace. Tomando esto en cuenta, el modelo que utiliza de una forma más completa estos datos es uno basado en los intervalos de tiempo entre inspección (lavado). Se respetan las secciones ya creadas por la empresa dentro de la línea y se comparan las periodicidades actuales de lavado con las arrojadas por el modelo.

Siendo este el modelo más completo al que la empresa puede acceder por el momento, no es igualmente el mejor, por lo que si Transelec busca un modelo que también tome en cuenta las condiciones de los aisladores, se recomienda analizar la incorporación de nuevos datos que complementen el modelo.

Glosario

- **Aislador**: Los aisladores son piezas de material aislante empleadas para aislar eléctricamente y soportar mecánicamente los conductores eléctricos de las líneas eléctricas de transmisión y distribución. Típicamente son aisladores de disco cuyas características están normalizadas según el peso o fuerza soportable, nivel de contaminación admisible y diámetro.
- **Activo**: Un activo es un bien que la empresa posee y que puede convertirse en dinero u otros medios líquidos equivalentes.
- **Camanchaca**: La Camanchaca es un tipo de neblina costera, dinámica y muy copiosa. La Camanchaca se produce generalmente en el sur del Perú y en el norte de Chile. Específicamente, durante el día el mar absorbe calor irradiado por el sol actuando como moderador térmico. Durante la noche y la madrugada libera este calor, que a la vez produce vapor.
- **CIGRE**: El Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE por su nombre en francés) es una organización global en el campo de la alta tensión eléctrica. Fue fundada en París, Francia el año 1921. El foco de sus actividades incluye aspectos técnicos y económicos de las redes eléctricas, así como también las regulaciones ambientales.
- **Coordinador eléctrico nacional (CEN)**: El Coordinador Eléctrico Nacional es un organismo técnico e independiente, encargado de la coordinación de la operación del conjunto de instalaciones del Sistema Eléctrico Nacional que operen interconectadas entre sí.
- **Distancia de fuga**: De acuerdo a IEEE Std C57.19.00-2004, la distancia de fuga se define como la distancia medida a lo largo del contorno externo del aislante que separa la parte metálica conductora de la alta tensión y la brida metálica de acoplamiento.
- **Energía superficial**: La energía superficial se define como la suma de todas las fuerzas intermoleculares que se encuentran en la superficie de un material, es decir, el grado de atracción o repulsión de las moléculas de la superficie. Para el caso de los líquidos esta misma definición es la que se aplica para definir la tensión superficial. Los líquidos con poca superficie tiende a contraerse y a formar gotas.
- **Flashover**: Fenómeno de corto circuito eléctrico de alta tensión hecho a través del aire entre conductores expuestos.
- **IEC 815**: Norma IEC que regula la selección de aisladores de alta tensión para ambientes contaminados.
- **Lixiviar**: Tratar una sustancia compleja, como los contaminantes, con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles.

- **SAP**: Compañía alemana especializada en software ERP (Enterprise Resource Planning). Este tipo de software tiene aplicaciones en contabilidad, gestión de almacén, gestión de clientes, gestión de producción, entre otros. En principio, por su flexibilidad, se adapta a todas las empresas. Es decir es una solución estándar, modular y es generalmente más barata que una solución a medida.

- **SIC**: El sistema interconectado central (SIC) era una red de conexiones que abarcaba desde la tercera región hasta la décima región. Este Sistema era el mayor de los cuatro sistemas eléctricos que suministraban energía al territorio chileno. Este sistema fue conectado a con su equivalente del norte grande chileno SING para dar paso a la red interconectada más grande de Chile.

- **Sílice pirógena**: Es un material hidrofóbico utilizado en los aisladores poliméricos. El sílice precipitado se puede volver hidrófobo con clorosilano o trimetilsilano en la solución de precipitación. El sílice hidrofobizado se filtra, se lava y se seca y luego es templado a una temperatura de entre $300 - 400$ grados Celsius para finalizar la reacción.

- **SING**: Era el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y fue una red compuesta por centrales generadoras, líneas de transmisión y vías de distribución que abastecía de energía desde Arica (XV Región de Arica y Parinacota), hasta Taltal (II Región de Antofagasta). Fue conectado recientemente con su equivalente SIC.

- **Tensión Interfacial**: Una propiedad de la interfaz entre dos fases inmiscibles. La tensión interfacial se produce porque una molécula cerca de una interfaz tiene interacciones moleculares diferentes de una molécula equivalente dentro del fluido estándar.

- **Vulcanización**: La vulcanización es un proceso mediante el cual se calienta el caucho crudo en presencia de azufre, con el fin de volverlo más duro y resistente al frío. Durante la vulcanización, los polímeros lineales paralelos cercanos constituyen puentes de entrecruzamiento entre sí. El resultado final es que las moléculas elásticas de caucho quedan unidas entre sí a una mayor o menor extensión. Esto forma un caucho más estable, duro, mucho más durable, más resistente al ataque químico y sin perder la elasticidad natural. También transforma la superficie pegajosa del material en una superficie suave que no se adhiere al metal o a los sustratos plásticos.

Índice general

AGRADECIMIENTOS I

Abstract II

Glosario III

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Descripción de la empresa . . . 1
1.2. Motivación . . . 1
1.3. Objetivos . . . 2

2. MARCO TEÓRICO 3
2.1. Aisladores en lineas de transmisión . . . 3
2.1.1. Tipos de aisladores . . . 4
2.2. Gestión de activos . . . 5
2.2.1. Diagrama de Jackknife . . . 5
2.2.2. Mantenimiento basado en condiciones (CBM) . . . 6
2.3. Factores de contaminación en el norte grande de Chile . . . 7
2.3.1. Tipos de contaminación . . . 8
2.4. Proceso de flashover por contaminación . . . 8
2.5. Estado del arte . . . 10
2.5.1. Medición de la polución del aire . . . 10
2.5.2. Densidad del depósito de sal equivalente (ESDD) . . . 10
2.5.3. Densidad del depósito no-soluble (NSDD) . . . 11
2.5.4. Conductividad superficial . . . 11
2.5.5. Corriente de fuga . . . 12
2.5.6. Medición de efecto corona y descargas de banda seca por radiofrecuencias . . . 12
2.5.7. Termografías . . . 13
2.5.8. Emisión lumínica . . . 13
2.5.9. Mediciones de la distribución de campo magnético . . . 13
2.5.10. Inspecciones visuales . . . 14
2.5.11. Hidrofobilidad . . . 14
2.5.12. Medidas mitigatorias: Lavados . . . 15

3. DESARROLLO DEL MODELO DE MANTENIMIENTO 17
3.1. Descripción de la línea 1x220 kV Cóndores - Parinacota . . . 17
3.1.1. Clima y condiciones de contaminación . . . 18
3.1.2. División en secciones . . . 20
3.2. Disponibilidad de datos y plan actual de mantenimiento . . . 21
3.2.1. Datos sobre el plan de mantenimiento actual . . . 21
3.3. Modelo de mantenimiento propuesto: Optimización de la frecuencia de inspecciones . . . 24
3.3.1. Planteamiento del problema . . . 24
3.3.2. Datos . . . 26
3.4. Desarrollo del modelo . . . 30
3.4.1. Elección de una base de tiempo . . . 30
3.4.2. Frecuencias de inspección . . . 31
3.4.3. Tasa media de fallas . . . 38
3.4.4. Tiempos de inspección y de falla . . . 41
3.4.5. Costos . . . 44
3.5. Nuevo plan de mantenimiento propuesto . . . 46
3.5.1. Maximizar disponibilidad . . . 47
3.5.2. Cálculo de frecuencias de inspección para los distintos mantenimientos . . . 48
3.5.3. Costos anuales del nuevo plan de inspección . . . 54

4. COMPARACIÓN Y EXPANSIÓN DEL MODELO 56
4.1. Comparación del plan propuesto y el plan actual promedio de mantenimiento . . . 56
4.1.1. Periodicidades . . . 56
4.1.2. Costos . . . 61
4.2. Ampliación del modelo . . . 62
4.2.1. Optimización del modelo planteado . . . 62
4.2.2. Aplicación de un modelo más robusto: Mantenimiento basado en condiciones . . . 64
4.3. Aplicación a otras líneas de transmisión . . . 65

5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS 66

ANEXOS 70
5.1. Ejemplo de informe de lavados . . . 71
5.2. Ejemplo de informe IVP . . . 72
5.3. Ejemplo de informe termografias . . . 73
5.4. Ejemplo de informe coronografias . . . 74
5.5. Informe de reemplazo por aisladores siliconados . . . 75
5.6. Macros Excel . . . 76
5.7. Tablas de evaluación de datos . . . 80
5.8. Cotización aisladores de vidrio templado . . . 81

Índice de figuras

2.1. Aislador de vidrio de una línea de transmisión 4
2.2. Diagrama de Jackknife y sus cuadrantes. Diagrama referencial. Figura sólo válida para fines explicativos. Fuente: Ausenco Rylson, compañía australiana especializada en la optimización de sistemas de gestión de activos 6
2.3. Proceso de Flashover. Fuente: [1] 9
2.4. Ángulo de contacto Θ_C, hidrofobilidad 14

3.1. Sistema Interconectado del Norte Grande 18
3.2. Ubicación georeferenciada de la línea 1x220 Cóndores - Parinacota 19
3.3. Quebrada Camarones 21
3.4. Plan de mantenimiento actual, línea 1x220 kV Cóndores - Parinacota 22
3.5. Traspaso de datos de lavados a una planilla 32
3.6. Ejemplo: Organización de lavados por sección 33
3.7. Organización final lavados 34
3.8. Organización final Inspección Visual Terrestre 35
3.9. Organización final Reemplazo de aisladores de vidrio, estructuras 317, 318, 328 y 329 . . . 35
3.10. Organización final Coronografías 36
3.11. Organización final Termografías 36
3.12. Organización final reemplazo por aisladores siliconados 37
3.13. Gráfico de dispersión: Fallas/mes vs Inspecciones/mes 39
3.14. Gráfico de dispersión: Fallas/mes vs Inspecciones/mes y regresión hiperbólica 40
3.15. Coeficiente de determinación R^2 41
3.16. Diagrama de Jack Knife por secciones de la línea 1x220 Cóndores - Parinacota 44
3.17. Costos por realizar un mantenimiento completo en la línea, en USD 45
3.18. Inspecciones anuales según tipo de mantenimiento 45
3.19. Costos totales del actual plan de mantenimiento en USD 46
3.20. Disponibilidad del activo en función de la frecuencia de inspección 48
3.21. Inspecciones/mes promedio por sección, años 2012 - 2017 49
3.22. Resumen de inspecciones semestrales, años 2012 - 2017 49
3.23. Inspecciones/mes optima considerando proporciones de mantenimientos, años 2012 - 2017 50
3.24. Inspecciones/mes óptima por sección considerando proporciones de mantenimientos, años 2012 - 2017 50
3.25. Periodicidades óptimas en meses por sección considerando proporciones de mantenimientos, años 2012 - 2017 51
3.26. Inspecciones mensuales promedio, nuevo plan actualizado con las nuevas condiciones . . . 52

3.27. Inspecciones/mes óptima por sección considerando proporciones de mantenimientos y nuevas condiciones . . . 53
3.28. Inspecciones/mes óptima por sección considerando proporciones de mantenimientos, nuevas condiciones y nuevas secciones . . . 53
3.29. Periodicidades óptimas en meses por sección considerando proporciones de mantenimientos, nuevas condiciones y nuevas secciones . . . 54
3.30. Frecuencias anuales de mantenimiento del nuevo plan propuesto . . . 54
3.31. Costos unitarios de mantenimiento por sección . . . 54
3.32. Costos anuales en USD del plan de mantenimiento propuesto . . . 55

4.1. Lavados por año, 2012 - 2017 . . . 57
4.2. Comparativa de lavados, Plan actual vs Plan propuesto . . . 57
4.3. IVP por año, 2012 - 2017 . . . 58
4.4. Comparativa de IVP, Plan actual vs Plan propuesto . . . 58
4.5. Reemplazos por año, 2012 - 2017 . . . 59
4.6. Comparativa de reemplazos, Plan actual vs Plan propuesto . . . 59
4.7. Coronografías por año y por sección, 2012 - 2017 . . . 60
4.8. Termografías por año y por sección, 2012 - 2017 . . . 60
4.9. Comparativa de inspecciones totales anuales, Plan actual vs Plan propuesto . . . 61
4.10. Comparativa de costos anuales, Plan actual vs Plan propuesto . . . 62

5.1. Ejemplo de un informe de lavados, linea 1x220 Cóndores - Parinacota . . . 71
5.2. Ejemplo de un informe IVP, linea 1x220 Cóndores - Parinacota . . . 72
5.3. Ejemplo de un informe de termografias, linea 1x220 Cóndores - Parinacota . . . 73
5.4. Ejemplo de un informe de coronografias, linea 1x220 Cóndores - Parinacota . . . 74
5.5. Informe del estado del reemplazo de aisladores de vidrio por aisladores siliconados, linea 1x220 Cóndores - Parinacota . . . 75
5.6. Evaluación de datos para diferentes modelos aplicables de gestión de activos (por Montgomery, Hodkiewicz y Jardine) . . . 80
5.7. Cotización aisladores de vidrio templado . . . 81

Índice de tablas

3.1. Secciones de la línea 1x220kV Cóndores - Parinacota 20
3.2. Reemplazo por aisladores siliconados 24
3.3. Organización de datos por semestres 31
3.4. Seccionamiento de la línea 33
3.5. Fallas entre 2012 - 2017 37
3.6. Organización final de inspecciones y eventos de falla 38
3.7. Inspecciones mensuales vs Fallas por mes 39
3.8. MTTR: Fallas entre 2012 - 2017 42
3.9. Datos ordenados para el cálculo del MTTI 42
3.10. Datos ordenados por tramo para el diagrama de Jack Knife 43
3.11. Cálculo punto por punto de la disponibilidad del activo 47
3.12. Nuevo seccionamiento de la línea 1x220 Cóndores - Parinacota 51

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción de la empresa

Transelec es el principal proveedor de sistemas de alta tensión del país, con casi 10.000 kilómetros de lineas y cerca de 60 subestaciones de 500 kV y 220 kV desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de Los Lagos.

En este momento es la principal empresa de transmisión de energía eléctrica en Chile y transporta la energía que ilumina al 98 % de la población que habita entre Arica y Chiloé, con un 58 % de participación del Sistema Eléctrico Nacional.

La empresa es propiedad de un consorcio integrado por los fondos canadienses "Canadian Pension Plan Investment Board (CPP)", "British Columbia Investment Management Corp. (bcIMC)" y "Public Sector Pension Investment Board (PSP)", y de la empresa "China Southern Power Grid International (CSGI)".

La empresa se divide en 4 zonas diferentes. La Zona Norte entre las regiones de Arica y Parinacota y Coquimbo, la Zona Centro que comprende la región de Valparaíso y Metropolitana, la Zona Centro Sur que incluye la región del Libertador Bernardo O'Higgins y del Maule y la Zona Sur entre las regiones del Bío Bío y Los Lagos.

1.2. Motivación

La gestión de activos resulta trascendental para toda empresa que busca obtener una máxima confiabilidad y disponibilidad de los activos que tiene a su haber. En la transmisión eléctrica, la gestión de estos activos alcanza ribetes aún mayores debido a la cantidad de usuarios que pueden verse afectados por una falla en el sistema y al uso intensivo de infraestructura asociada a este servicio. Un evento como este tiene impacto directo en la población del país, efectos económicos directos asociados a la mitigación de la falla y costos indirectos, tales como multas y compensaciones producto de incumplimientos en calidad de servicio.

Transelec es el principal proveedor de sistemas de alta tensión en Chile, con casi 10.000 kilómetros de líneas de transmisión que representan sobre un 80 % del total instaladas en el SIC y el SING (cifras al 2017). Posee activos operando en gran parte del país, algunos de los cuales se encuentran en zonas remotas, de difícil acceso y que deben estar sujetos a un mantenimiento periódico y eficiente lo que propone un desafío de inversión y logístico para la empresa. En el norte del país, el lavado y la limpieza de aisladores en las líneas de transmisión por parte de Transelec se ha venido realizando periódicamente y en intervalos de tiempo definidos por un método basado, principalmente, en el criterio experto. Este método presenta algunas problemáticas como las siguientes:

- Percepción de realización de sobre o sub mantenimiento.
- Confiabilidad sobre la ejecución del mantenimiento. La mala ejecución de una actividad de lavado sobre una única cadena de aisladores puede provocar una falla.

Un ejemplo de este tipo de mantenimiento es el realizado en la línea simple circuito de 220 kV entre las subestaciones Cóndores y Parinacota, ubicada entre las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá. El mantenimiento de sus aisladores se realiza por tramos y consta principalmente en el lavado de las cadenas y, en menor medida, en la limpieza y el reemplazo de cadenas de aisladores contaminados. Este caso se da, por ejemplo, en la quebrada camarones en la región de Tarapacá con una periodicidad aproximada de seis meses. Según datos de la empresa, entre el 2006 y el 2016 en esta línea se presentaron 20 eventos de falla de los cuales el 30 % fueron debidos a la contaminación. Cabe señalar que, al no existir redundancia en esta zona, cada falla provoca la desconexión de los consumos regulados por esta instalación. Es en este contexto donde aparece la necesidad de migrar hacia una estrategia de mantenimiento que trabaje con datos concretos y que pueda corroborar o sugerir los periodos de mantenimiento. Para esto, es necesario trabajar en conjunto con Transelec para reorganizar los datos que ya se tienen de dichos mantenimientos y generar un nuevo modelo.

1.3. Objetivos

- Objetivo general:

  Proponer un modelo de mantenimiento basado en la inspección y lavado de aisladores sujetos a contaminación en la línea 220kV Cóndores - Parinacota

- Objetivos específicos:

  1. Revisar el estado del arte de las tecnologías existentes en la inspección y mantenimiento de aisladores con condiciones similares a la linea Cóndores - Parinacota, para considerar su utilización en el modelo de mantenimiento a proponer.
  2. Identificar los factores de falla relevantes asociados a la contaminación de los aisladores presentes en las líneas de alta tensión ubicadas en sectores con alta contaminación en la zona norte chilena.
  3. Diseñar un modelo utilizando datos históricos de Transelec y el Coordinador Eléctrico nacional, aplicable al mantenimiento de los aisladores en la linea 220kV Cóndores - Parinacota que pueda mejorar la logística y los costos del modelo actual de la empresa.
  4. Identificar la información adecuada para poder desarrollar un modelo de mantenimiento mas robusto y basado en condiciones de los aisladores contaminados en las lineas de transmisión en la zona norte chilena.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Aisladores en lineas de transmisión

Las cadenas de aisladores son un componente importante de todas las instalaciones eléctricas. En las líneas de alta tensión los aisladores cumplen las funciones de limitar el paso de corriente solo al circuito deseado y de entregar un soporte mecánico a los cables aéreos. En las líneas de media y alta tensión se utilizan aisladores de cadena formados por discos de material aislante. La cantidad de discos, el diámetro y el tipo de material de los aisladores depende del diseño y las necesidades de la línea de transmisión.

La forma del aislador tiene gran importancia en el caso de sobretensiones. La corriente de fuga en la superficie del aislador puede ser importante si la superficie está húmeda o polvorienta. Éste factor se tiene en cuenta para el diseño de la campana, cuya parte inferior evita la humedad y dificulta el paso de la corriente de fuga.

Los aisladores se someten a ensayos mecánicos para descubrir los fallos del material; se efectúan ensayos de sobretensión en seco y bajo lluvia, aplicándoles tensión hasta que salta un arco por la parte exterior. Después se examina la superficie del aislador para comprobar si ha sufrido daños. La tensión de perforación se comprueba sumergiendo el aislador en un baño de aceite y aumentando la tensión hasta que el aislador falle.

Algunos de los aspectos importantes que hace falta notar al momento de seleccionar un aislador son:

1. Aplicación del aislador (donde y cómo se utilizará).
2. Características de los aisladores disponibles.
3. Características del sistema de potencia donde se utilizará.
4. El ambiente (interior, exterior, seco, húmedo, etc).
5. Restricciones (medidas máximas, estructura donde se instalará).
6. Rendimiento en terreno: Recuperar informaciones sobre el rendimiento del tipo de aislador en aplicaciones similares pasadas.

A continuación, se muestran algunos tipos de aisladores utilizados en este tipo de líneas.

2.1.1. Tipos de aisladores

Aisladores de vidrio y porcelana

En la linea 1x220kV Cóndores - Parinacota se utilizan aisladores de vidrio templado en cadenas de diferente tamaño. Este tipo de aisladores poseen buenas propiedades de peso, fuerza soportable, resistencia a la de contaminación razonable y distintas dimensiones dependiendo de las necesidades. Las partes de este tipo de aisladores se muestran en la figura 2.1.

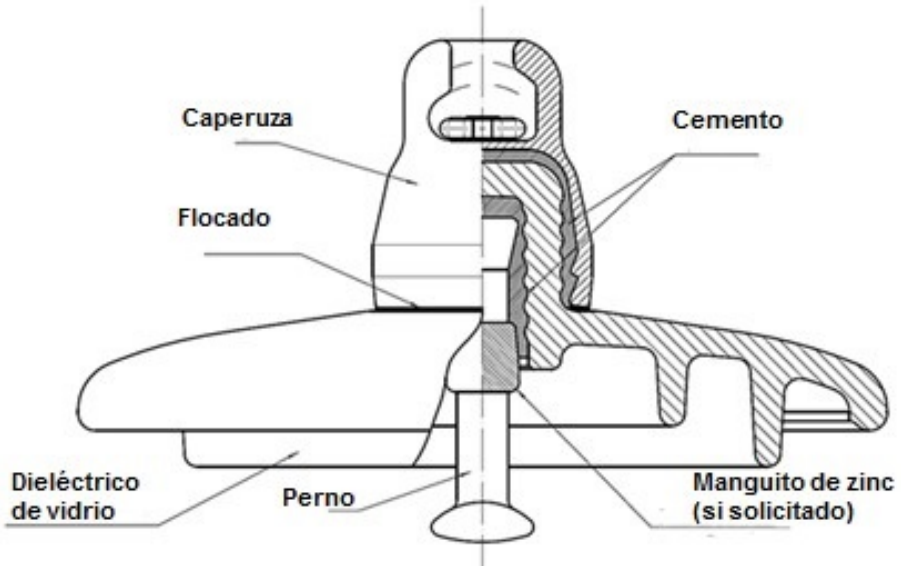


Figura 2.1: Aislador de vidrio de una línea de transmisión

Aisladores poliméricos

Por razones de especificaciones y precio, los aisladores utilizados en esta línea de transmisión son de vidrio, pero en el ultimo año, estos han comenzado a reemplazarse por aisladores siliconados (poliméricos) en las partes de la linea con mayores problemas de contaminación y mantenimiento.

A diferencia de los aisladores de vidrio o porcelana, para dimensiones similares la elección del material cobra una importancia mayor que la distancia de fuga con respecto a los niveles de contaminación aceptados. La utilización de materiales o recubrimientos hidrofóbicos aumentan la vida útil del aislador.

Estas ventajas son especialmente atractivas para extra altos voltajes de líneas de transmisión. Particularmente, si una línea pasa a través de áreas de difícil acceso donde se requiere de helicópteros para su construcción, el uso de aisladores no cerámicos puede ofrecer ahorros considerables.

Se destacan una gran variedad de materiales con características hidrofóbicas con alta resistencia a la tracción y bajo peso[2]. Los aisladores siliconados, los mismos que Transelec instala en la línea estudiada, se han comenzado a usar ampliamente para ambientes similares de alta contaminación (México [3], Canarias [4]). Una ventaja considerable de este tipo de aisladores es que las características hidrofóbicas son traspasadas a los agentes contaminantes que se encuentran sobre la superficie, lo que disminuye los efectos de la contaminación.

2.2. Gestión de activos

La gestión de activos es la disciplina que busca gestionar todo el ciclo de vida de los activos físicos de una organización con el fin de maximizar su valor. Cubre distintas áreas como el diseño, construcción, explotación, mantenimiento y reemplazo de activos. Se refiere generalmente a esta actividad como gestión de activos "empresariales" debido a que se actúa sobre los activos ubicados en diferentes departamentos, localizaciones, instalaciones y, en algunos casos, sobre distintas unidades de negocio.

En Transelec la gestión de activos tiene retos que incluyen la mejora de la productividad (menos eventos de falla), la maximización del ciclo de vida de los activos, la minimización del coste total de mantenimiento y el logro de un alto nivel de confiabilidad de las instalaciones.

Dentro de Transelec es el departamento de Ingeniería de Confiabilidad y Riesgo, en la Vicepresidencia de Operaciones, el encargado de realizar estas funciones a largo plazo. Los planes de mantenimiento son ejecutados directamente por las diferentes gerencias zonales de Transelec. Este trabajo se terciariza mediante empresas contratistas.

Dentro de la disciplina de gestión de activos existen algunas herramientas que ayudan a la priorización de las necesidades de mantenimiento. Se pueden mencionar, por ejemplo, los diagramas de "Pareto" y de "Jackknife" que utilizan un sustento estadístico basado en los datos de mantenimiento y de fallas y que ayudan a focalizar las inversiones en la gestión de activos. Para este trabajo se ha utilizado el diagrama de Jackknife, cuya utilidad y sustento estadístico se explican a continuación.

2.2.1. Diagrama de Jackknife

El método de Jackknife es una técnica utilizada para la priorización de la gestión de activos. Está basada en métodos de dispersión logarítmica que utiliza el tiempo promedio de reparación (MTTR) y el número de fallas asociadas al activo para la realización de un gráfico. Se utiliza el término "indisponibilidad" como el tiempo (porcentaje del tiempo total de estudio) en el que el activo se mantiene bajo reparaciones o bajo condiciones de falla. La indisponibilidad "D" se define como

$$D = MTTR \cdot frecuencia$$

.

En le figura 2.2 se muestra un diagrama de Jackknife y su subdivisión en cuatro cuadrantes:

- Cuadrante superior izquierdo: Fallas agudas, tipos de falla de baja incidencia pero de un largo tiempo de reparación.
- Cuadrante Inferior izquierdo: Fallas leves, baja frecuencia y bajo tiempo de reparación.
- Cuadrante inferior derecho: Fallas crónicas, alta frecuencia pero de un bajo tiempo de reparación.
- Cuadrante superior derecho: Fallas criticas, alta frecuencia y alto tiempo de reparación.

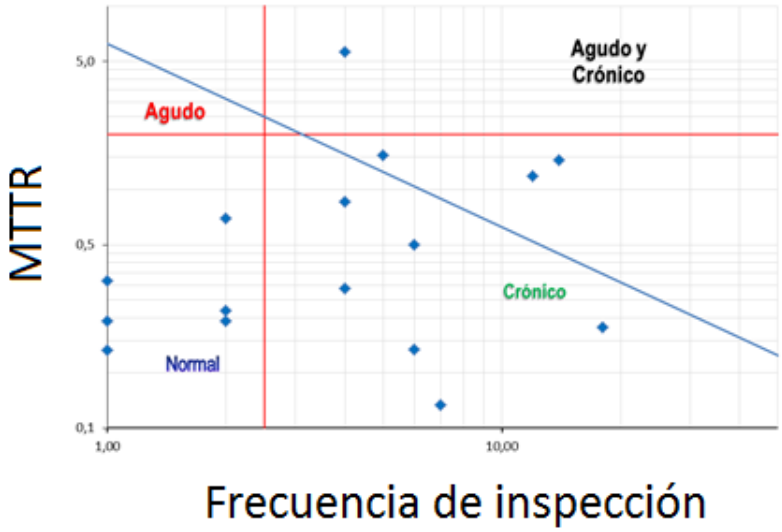


Figura 2.2: Diagrama de Jackknife y sus cuadrantes. Diagrama referencial. Figura sólo válida para fines explicativos. Fuente: Ausenco Rylson, compañía australiana especializada en la optimización de sistemas de gestión de activos

Los cuadrantes se forman mediante el "límite de fallas agudas" y el "límite de fallas crónicas". Estos límites pueden ser creados en base a las necesidades de mantenimiento de la empresa o por límites de tiempos de reparación apropiados. Generalmente, se utilizan los valores promedio de tiempos de mantenimiento (MTTR) y de frecuencias para fijar estos límites. Para diferenciar la criticidad se utiliza una linea de equi-indisponibilidad, que cruza todos los puntos con un mismo valor de indisponibilidad, como por ejemplo, la línea azul que atraviesa el esquema de la figura 2.2.

Priorización de las actividades de mantenimiento

Cada punto de la figura 2.2 representa el tiempo medio para reparar (MTTR) y la frecuencia de inspección del activo. Mientras más lejos se encuentre este punto del "origen" del gráfico, más atención con respecto al mantenimiento necesita el activo lo cual lo transforma en un activo prioritario para la toma de medidas. De esta forma y tomando en cuenta el evento de mantenimiento con mayor criticidad, se deberían tomar medidas sobre su mantenimiento para bajar su indisponibilidad.

2.2.2. Mantenimiento basado en condiciones (CBM)

Mantenimiento Basado en la Condición, CBM por las siglas de su nombre en Inglés Condition-based Maintenance, tiene como base la Monitorización de las condiciones o estado de los diferentes elementos de una máquina o equipo para decidir el momento óptimo (más adecuado) para realizar las tareas de mantenimiento.

El objetivo de este tipo de mantenimiento será disponer de la máxima cantidad de datos objetivos sobre la máquina, para poder identificar los posibles fallos que generen incidentes o paradas no deseadas antes de que aparezcan; para ello utilizan el análisis de las tendencias de todos los datos recolectados.

Algunos tipos de datos utilizados para este tipo de mantenimiento son:

- Control de Temperatura, bien mediante termómetros de contacto, infrarrojos, termografía, etc.
- Monitorización Dinámica, control de la energía emitida por equipamientos mecánicos, como el Analisis de Vibraciones, Medida de ultrasonidos, etc.
- Análisis de Aceites, para comprobar las cualidades de cualquier tipo de aceite, sea cual sea su función: Aceites Lubricantes, Aceites Hidráulicos, Aceites Aislantes
- Control de corrosión
- Comprobaciones no destructivas (Rayos X...)
- Comprobaciones Elécticas
- Supervición del Rendimiento, comparando datos nominales con los reales en cuando a Caudales, Presiones, tiempos, temperaturas, voltaje, etc.

2.3. Factores de contaminación en el norte grande de Chile

Existe una relación directa entre el fenómeno de flashover y la superficie contaminada del aislador. La conductividad depende de algunos factores generales como:

- La cantidad de contaminantes en la superficie del aislador; esto viene determinado por el proceso de depósito de agentes contaminantes.
- El tipo de contaminantes presentes, sumado a las condiciones de humedad.
- Las condiciones naturales de limpieza de los aisladores (lluvias).
- Si la superficie contaminada esta constituida por áreas concentradas o por un área uniforme.
- Las condiciones climáticas y ambientales en donde se instala el aislador.

Algunos factores específicos que están presentes en el norte grande chileno son:

- Polución depositada por el viento: Los cambios de presión en la atmósfera y la diferencia de temperatura entre dos lugares causan corrientes de aire que varían en dirección y velocidad. Existe una buena relación entre la cantidad de contaminantes (materiales solubles e insolubles) y la velocidad del viento instalado cerca de la costa.
- Excrementos y desechos de aves: Las aves cercanas al mar y de un tamaño considerable utilizan las lineas y torres de alta tensión como puntos de visión, de paso e incluso algunas las consideran un buen lugar para anidar. Con la presencia de estas aves, vienen también sus desechos biológicos altamente conductores y con contenido salino, lo que puede causar descargas en los aisladores.
- Contaminación por industrias químicas o mineras: Existe bastante explotación de recursos minerales en la zona norte del país. Esta explotación trae consigo movimientos de tierra y un flujo de autos elevado que aumenta las partículas contaminantes en el aire. Esto, sumado a las industrias químicas, de tratamiento de minerales e incluso termoeléctricas, hace aumentar la cantidad de contaminantes presentes naturalmente en el aire.

- Autopistas, caminos y asentamientos humanos: Los aisladores situados más cerca de asentamientos humanos o rutas transitadas frecuentemente por autos tienen, en promedio, una tasa de fallas más altas. Esto se estudió en el trabajo sobre aisladores contaminados realizado por Fabián Concha [5].
- Mecanismos de disolución de contaminantes: Dadas las bajas precipitaciones presentes en esta zona, los depósitos solubles de contaminación son disueltos sobre todo por la niebla presente en las mañanas y por las partículas de agua traídas por el viendo directamente desde el mar. La condensación es también una causa de la disolución de electrolitos en ambientes desérticos. En la noche y con las bajas temperaturas la superficie de los aisladores baja del punto de rocío y las partículas de agua presentes el aire se condensan. Esto crea las condiciones para el fenómeno de flashover, dando como resultado que una gran cantidad de fallas de esta linea se producen en la madrugada.

2.3.1. Tipos de contaminación

Para aumentar la probabilidad de falla de una cadena de aisladores de alta tensión la contaminación debe formar o influir negativamente sobre una capa conductora en su superficie, por este motivo, la polución puede ser clasificada como activa o inerte.

1. Contaminación activa: Se considera a los agentes contaminantes que aportan directamente material a la capa conductora que se forma sobre los aisladores. Se puede clasificar en dos tipos:
   - Contaminación conductora: Dentro de este tipo de polución se encuentran los depósitos metálicos relacionados a la industria minera, los excrementos de las aves y algunos contaminantes que vienen ya disueltos en agua como las partículas de agua salada provenientes del mar gracias al viento.
   - Contaminación que debe estar disuelta en agua para ser conductora: Electrolitos que se encuentran en la arena del desierto y otros elementos como la ceniza y las partículas de cemento.
2. Contaminación inerte: Mientras más grande es el deposito de material inerte sobre la superficie de un aislador de alta tensión, mayor es la capa de agua retenida por estos sobre el aislador y, por lo tanto, los electrolitos sobre la superficie tienen una mayor área de disolución.

2.4. Proceso de flashover por contaminación

El proceso de flashover se ve afectado por las propiedades de la superficie que puede tener una cadena de aisladores. Se pueden identificar dos tipos distintos de superficies las cuales están presentes también en los aisladores de la linea 1x220kV Cóndores - Parinacota. Una superficie “Hidrofílica” esta asociada generalmente con los aisladores cerámicos y de vidrio y una superficie “Hidrofóbica” está asociada a aisladores poliméricos, como los siliconados. Ambos tipos de aisladores están presentes en la linea de transmisión estudiada en esta memoria. Los primeros, de vidrio, han estado presentes a lo largo de toda la linea y fueron elegidos por sus características mecánicas, de buena resistencia a la contaminación y precio. Cuando los primeros, de vidrio, se enfrentan al agua (lluvias, neblina, roció) la superficie se moja completamente creando una capa de material electrolítico sobre el aislador. Los segundos, siliconados, se han estado instalando en secciones específicas de la linea gracias a sus características positivas contra la contaminación y mantenimiento, pero solo en algunos tramos debido a su alto costo que, aunque ha bajado a lo largo de los años, sigue manteniéndose elevado respecto a las otras alternativas [6]. En estos últimos,

la humedad forma pequeñas gotas independientes sobre la superficie del aislador por su característica hidrofóbica, evitando una capa conductora uniforme.

Como se ha mencionado, los aisladores de vidrio están presentes en la totalidad de la línea y se han ido intercambiando poco a poco solo en algunos sectores. El proceso de flashover en los aisladores poliméricos se destaca por pequeñas descargas parciales locales que fatigan el material y, a largo plazo, generan la necesidad de recambio sin casi mantenimiento.

El proceso de flashover en los aisladores hidrofílicos se caracteriza por las siguientes etapas [1][7][8] (Esquema en la figura 2.3):

1. El aislador se recubre con una capa de material conductor (sales, metales, ácidos, etc).
   - La superficie del aislador se humedece completa o parcialmente (lluvias, rocío, condensación, humedad ambiental, etc). La lluvia fuerte puede cumplir también la función inversa de lavar los aisladores, pero en el norte de Chile, generalmente, no es este el caso.
2. Una vez energizado el aislador, y en presencia de una capa conductora, una corriente de fuga superficial comienza a fluir por la superficie. El calor producido comienza a secar algunas partes de esta capa conductora.
3. El secado de la etapa anterior nunca es uniforme. En algunas partes, la capa conductora se quiebra y limita el flujo de corrientes de fuga
4. Las tensiones Linea-Tierra son aplicados en estas fisuras de la capa aisladora, las cuales son atravesadas por arcos de corrientes que rompen el aire. Esto se produce eléctricamente en serie con la resistencia de la parte no seca de la capa de contaminación.
5. Si la resistencia de la parte no seca de polución es lo suficientemente baja los arcos cruzando las fisuras de la capa de polución ocurren continuamente lo que extiende estas fisuras. Esto produce la presencia de más arcos en la superficie del aislador hasta que finalmente se produce el fenómeno de flashover.

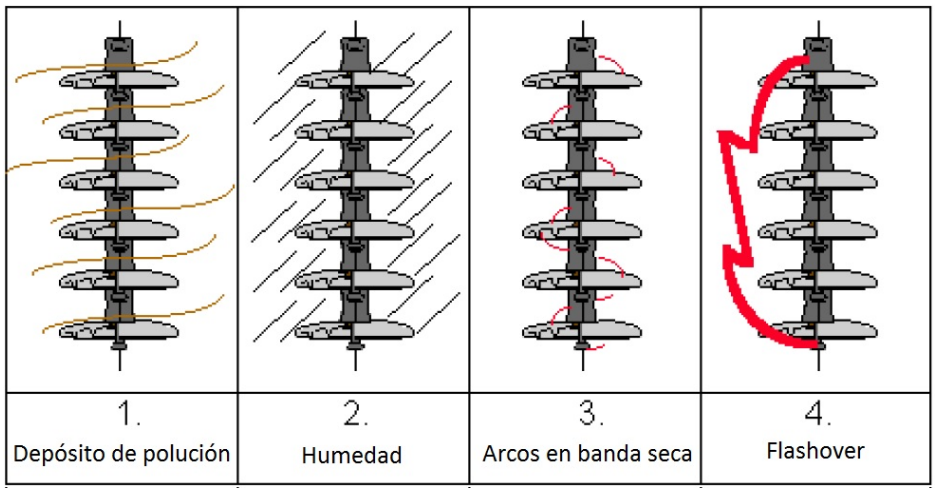


Figura 2.3: Proceso de Flashover. Fuente: [1]

2.5. Estado del arte

Con el desarrollo de la industria eléctrica del siglo 20, se han desarrollado herramientas para conocer el estado de los aisladores con respecto a la contaminación de forma directa e indirecta.

2.5.1. Medición de la polución del aire

Las mediciones de polución en el aire son realizadas tomando como principal suposición que existe una relación entre el fenómeno de flashover y el análisis físico y químico del aire.

- Pros:
  - Es económico y fácil de realizar
  - Los resultados son directos
- Contras:
  - Hacen falta otros datos para conocer una relación entre el valor obtenido y la posibilidad de flashover.
  - Son necesarios periodos de tomas de muestra extensos para los ensayos.
  - La presencia de lluvias influencia mucho los resultados obtenidos.

2.5.2. Densidad del depósito de sal equivalente (ESDD)

Este indicador entrega el depósito equivalente en $mgNaCl/cm^2$ sobre la superficie de un aislador. El ESDD se determina removiendo la contaminación de la superficie de un aislador y disolviéndola en una cantidad conocida de agua. Normalmente se utiliza como estándar la norma IEC 507. La conductividad resultante de esta solución, el volumen y la temperatura son utilizados para calcular el valor ESDD.

Dentro de sus posibles aplicaciones existen estudios que incluso evalúan la posibilidad de integrar este indicador en Redes Neuronales Artificiales (ANN por sus siglas en ingles) [9] que incluyan también mediciones de viento, humedad , presión del aire, lluvias y temperaturas.

- Pros:
  - El indicador entrega valores reales de conductividad ya que se toman muestras sobre un aislador real para realizar las pruebas.
  - Existen normas y experiencias internacionales en el uso de este indicador en la industria
  - Comparativamente, es un método económico para conocer el estado de la aislación.
- Contras:
  - El valor obtenido es válido sólo para el aislador ensayado. Los valores para los aisladores cercanos pueden ser los mismos, pero generalmente las condiciones ambientales cambian en todas las estructuras.
  - Es un método que consume mucho tiempo.
  - El método no diferencia entre depósitos de solubilidad rápida o lenta.

- Existe incertidumbre al aplicar este método a aisladores poliméricos por sus características hidrofóbicas
- Es un método invasivo, es decir, el aislador debe ser intervenido (lavado) por lo que los valores obtenidos son reales solo hasta antes del ensayo. Luego del ensayo el aislador cambia su estado.

2.5.3. Densidad del depósito no-soluble (NSDD)

Este indicador es medido, algunas veces, en conjunto con el ESDD. Caracteriza al contenido de contaminación no-soluble de la capa de polución. Normalmente se expresa en mg/cm^2 en el área superficial del aislador.

Es un indicador muy importante debido a que la capacidad eléctrica de un aislador se ve afectada por el material inerte presente sobre él como se menciona en la sección 2.3.1.

- Pros:
  - Se puede realizar en conjunto con las mediciones de ESDD.
  - Se puede realizar por inspección visual, entregándose datos del espesor de la capa contaminante.
- Contras:
  - Este indicador por si solo no es de mucha utilidad y necesita ser complementado con otros indicadores

2.5.4. Conductividad superficial

Este indicador hace referencia a la razón de la corriente circulando sobre un aislador y la tensión aplicada [1]. La tensión debe ser suficientemente alta para obtener lecturas de corriente sobre la superficie y suficientemente baja (y de corta duración) para evitar sobre calentamientos y otros efectos de las descargas.

La conductividad del un aislador demuestra su estado. Esta medición incluye los efectos de la cantidad de agentes contaminantes y del grado de humedad. Humedeciendo el aislador artificialmente este puede ser ensayado continuamente. Si la cantidad de humedad no es suficiente para lixiviar[1] esta técnica puede ser utilizada para monitorear la creación de la capa contaminante.

Para normalizar las mediciones, se utiliza un "factor de forma" dependiendo de las características constructivas del aislador.

- Pros:
  - El deterioro por efectos ambientales de la superficie del aislador puede ser monitoreado.
  - Se puede realizar en sectores desenergizados de la línea de transmisión.
  - El aislador de prueba no se encuentra bajo una tensión constante lo que reduce el riesgo de flashover
  - El método puede ser automatizado lo que puede ayudar a monitorear las condiciones de contaminación continuamente.
- Contras:

[1] Tratar una sustancia compleja, como un mineral, con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles.

- Las mediciones sólo pueden hacerse bajo condiciones de humedad.
- Por la complejidad del equipamiento necesario, este método es considerado costoso.
- Las condiciones críticas de humedad de un aislador no son determinadas.

2.5.5. Corriente de fuga

La corriente de fuga a través de un aislador depende de la tensión de servicio y de la conductancia de la capa superficial. Cuando la corriente de fuga supera un cierto nivel es recomendable una inspección preventiva sobre el aislador. Existen varias formas de realizar este ensayo como por el método de "I_{maxima}" o "Conteo de descargas" [1].

En Monterrey, México, se ha experimentado con la medición de corriente de fuga en una línea de 400kV para mantener mediciones constantes sobre el estado de la aislación y así poder tomar decisiones oportunas de mantenimiento preventivo[3].

- Pros:
  - Los aisladores son ensayados en servicio, por lo tanto se obtienen valores reales de aislación.
  - El costo, dependiendo de las condiciones en donde se realice, puede tener un valor razonable.
  - Este método entrega información en todas las etapas del mecanismo de flashover por contaminación.
- Contras:
  - Los valores deben ser contrastados con valores obtenidos de mediciones realizadas previamente sobre el mismo aislador debido a que las condiciones climáticas cambian en cada estructura y con ellos los valores críticos de corriente de fuga.
  - Los equipos para realizar el ensayo tienen un costo alto.
  - Los valores son sólo validos para el tipo de aislador ensayado.

2.5.6. Medición de efecto corona y descargas de banda seca por radiofrecuencias

Un estudio realizado en Australia ha trabajado sobre un método para descubrir el nivel de descargas de banda seca y diferenciarlos con las descargas producidas en el aire conocidas como efecto corona [10].

Han sido clasificadas las frecuencias de los fenómenos de efecto corona y de descargas de banda seca y se ha concluido que la banda entre 800-900 MHz agrupa las descargas entre las capas de contaminantes, por lo tanto, al medir las frecuencias de la energía emanada de estas descargas, se puede tener una visión del estado de la aislación.

- Pros:
  - Se puede mantener un monitoreo constante del estado de la aislación.
- Contras:
  - Es un método relativamente nuevo y hace falta más experiencia de campo para hacerlo más confiable
  - No existen normas que indiquen procedimientos predefinidos para la realización de estos ensayos.

2.5.7. Termografías

Las lecturas infrarrojas de la temperatura pueden encontrar defectos en la aislación. Esto se debe a que la degradación de los materiales bajo el efecto de campos eléctricos está, en muchos casos, asociado a la generación de calor [2]. También las descargas superficiales pueden ser detectadas utilizando mediciones infrarrojas.

- Pros:
  - Puede detectar una disminución de la hidrofobia de los materiales poliméricos.
- Contras:
  - Debido a que las temperaturas inducidas sobre la superficie del aislador son generalmente pequeñas, las mediciones pueden ser afectadas por las condiciones ambientales como vientos, lluvias, radiación solar, etc.

2.5.8. Emisión lumínica

Se utilizan amplificadores de luz para detectar las pequeñas descargas producidas en la superficie del material [2]. Generalmente estos destellos lumínicos son buenos indicadores del inicio de la erosión o de cortes en los aisladores recubiertos. De noche la luz emitida puede ser observada a simple vista, sin embargo, la mayoría de los fotones poseen longitudes de onda entre los 300 - 400 nm y se encuentran fuera de del rango visible de equipos de observación nocturna y de la visión humana. Es por esto que se utilizan equipos sensibles UV-A.

- Pros:
  - Se pueden detectar los daños en el aislador de una manera temprana.
- Contras:
  - Estas observaciones deben realizarse de noche para evitar la radiación solar o contar con un filtro de longitudes de onda.

2.5.9. Mediciones de la distribución de campo magnético

La distribución de campo eléctrico alrededor de los aisladores esta influenciada por la permitividad, conductividad y la geometría del material utilizado [2]. Los tipos de contaminantes y la humedad también pueden afectar a esta distribución de campo eléctrico.

- Pros:
  - Puede detectar defectos superiores a un tamaño mínimo en el aislador. Se facilita este proceso al humedecer el aislador.
  - Puede detectar el lugar del defecto sobre el aislador.
  - Existen algunos defectos en el aislador que no pueden ser detectados de manera visual pero que si pueden ser detectados mediante este método, como daños internos o muy pequeños los cuales fueron detectados y confirmados luego con una autopsia del aislador [11].

-

- Contras:
  - Se recomienda realizar estos ensayos en laboratorio para evitar interferencias de factores externos.

2.5.10. Inspecciones visuales

Es una de los tipos de inspecciones más comunes y básicas realizadas para comprobar el estado de los aisladores. Consta de recorrer la linea de transmisión observando las anomalías no solo de los aisladores, sino que también de los accesos a las torres, señalética, infraestructuras, etc.

- Pros:
  - Es un tipo de inspección de muy bajo costo.
  - También entrega información sobre otros elementos de la linea.
- Contras:
  - Debe ser realizado por alguien con experiencia y que sea capaz de analizar el estado de la aislador de manera visual.
  - No entrega datos certeros ni comparables.

2.5.11. Hidrofobilidad

La hidrofobilidad de los materiales se establece midiendo los ángulos de contacto [2]. Uno de los métodos es llamado "sessile drop technique" [12] y consta en medir el angulo de contacto de una gota de un liquido con una tensión superficial conocida (figura 2.4).

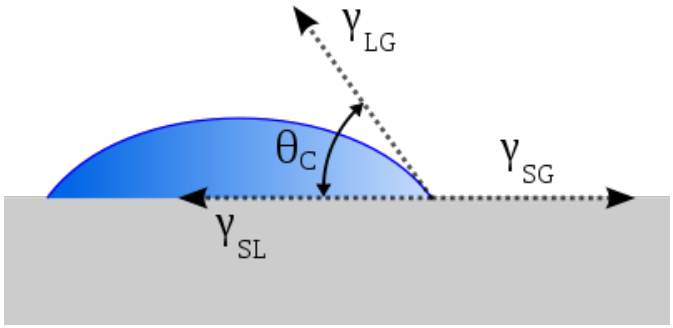


Figura 2.4: Ángulo de contacto Θ_C, hidrofobilidad

- Pros:
  - Entrega el estado de los recubrimientos poliméricos de un aislador.
  - Existen herramientas computacionales para realizar las mediciones.
- Contras:

- No existen muchas maneras diferentes de medir la hidrofobilidad.
- Si no se cuenta con las herramientas computacionales, las mediciones están sujetas al criterio de un operador.

2.5.12. Medidas mitigatorias: Lavados

Para la mitigación de los efectos de la polución, alargar la vida útil y evitar flashover se realizan constantes lavados en los aisladores. Las características de estos lavados dependen de factores como la severidad de la contaminación, las dificultades de acceso a la estructura y más [1].

El lavado con agua a presión debidamente purificada para quitar el exceso de sales, es el método más utilizado por Transelec para el mantenimiento de los aisladores de la línea de transmisión Cóndores - Parinacota. La empresa lo realiza mediante camiones aljibes que recorren la línea con cuadrillas de personas especializadas en esta labor. Pero esta no es la única manera en la que se lavan los aisladores de una linea de transmisión. Algunas se nombran a continuación:

- Dispositivos de agua a presión portátiles: Son los más utilizados por Transelec y es realizado por un operador experimentado.
- Dispositivos montados en helicópteros: Son muy útiles cuando los aisladores a lavar son de difícil acceso (quebradas, montañas, etc).
- Agua a presión a control remoto: Generalmente mediante la utilización de robots diseñados especialmente para el lavado de aisladores.
- Rociadores de agua fijos: Instalados en ciertas partes de una línea por lo general de difícil acceso. Poseen un suministro de agua fijo mediante tuberías o estanques.

También existe un lavado más exhaustivo que utiliza cepillos sobre la superficie del material y se realiza cuando la contaminación es excesiva.

Esta tarea se puede realizar con línea viva o des-energizada y contando siempre con altos estándares de seguridad.

Recubrimientos

Los recubrimientos en los aisladores de alta tensión se utilizan especialmente para evitar la formación de una capa de agua que permita la disolución de los contaminantes solubles [13]. La razón principal por la cual los aisladores cerámicos o de vidrio forman una capa de agua sobre sus superficies es debido a sus altas energías superficiales. Para evitar esto, se aplican capas protectoras que minimizan los niveles de corrientes de fuga a niveles de condiciones secas.

El aceite es un muy buen repelente del agua debido a su baja tensión interferencia con el agua. Algunos de los primeros aisladores cerámicos de ambientes muy contaminados fueron diseñados con un dispensador que dejaba fluir una capa constante de aceite.

Tipos de recubrimientos en base a grasa

Existen dos tipos de grasas: Jaleas de petroleo y grasas siliconadas. Básicamente la “grasa” es una combinación de aceite y sílice pirógena que transforma en hidrofóbica a la superficie del aislador. Este recubrimiento no reduce los niveles de contaminación pero los contaminantes son encapsulados por el aceite y el agua repelida.

Revestimientos de goma de silicona RTV

La necesidad de recubrimientos que duren más tiempo y con una resistencia más elevada a los rayos UV y los arcos de banda seca ha motivado el desarrollo de los revestimientos RTV. Estos recubrimientos pueden ser aplicados en aisladores cerámicos mediante pinturas, spray, etc. El revestimiento RTV es un componente polimérico liquido que al ser expuesto al aire se vulcaniza, transformándose en goma flexible.

Este tipo de recubrimientos encapsula los agentes contaminantes, por lo que no es necesario el mantenimiento en base a lavados como con sus pares de vidrio. Esto prácticamente elimina las corrientes de fuga y aumenta la vida útil del aislador. Según las experiencias de ALSTOM Transmission and Distribution en condiciones similares a las de la línea Cóndores - Parinacota en Qatar, se ha obtenido una vida útil de este tipo de aisladores por sobre los 20 años.

Aisladores con este tipo de recubrimientos están siendo instalados en algunas partes de la linea estudiada como medida para combatir los flashover producidos por la contaminación. Su precio es más elevado que los aisladores de cerámica o vidrio clásicos pero es una tecnología que ha disminuido sus costos en el tiempo.

Capítulo 3

DESARROLLO DEL MODELO DE MANTENIMIENTO

3.1. Descripción de la línea 1x220 kV Cóndores - Parinacota

La línea Cóndores-Parinacota, es una línea simple circuito de 220kV de tensión y es la encargada de suministrar energía eléctrica a la ciudad de Arica y sus alrededores en el norte de Chile. Por este motivo es trascendental el poder asegurar su correcto funcionamiento y la más alta disponibilidad y confiabilidad posibles. Para conocer su ubicación y las diferentes líneas de transmisión con las que convive, se muestra la configuración del SING antes de de su conexión con el SIC como referencia en la figura 3.1.

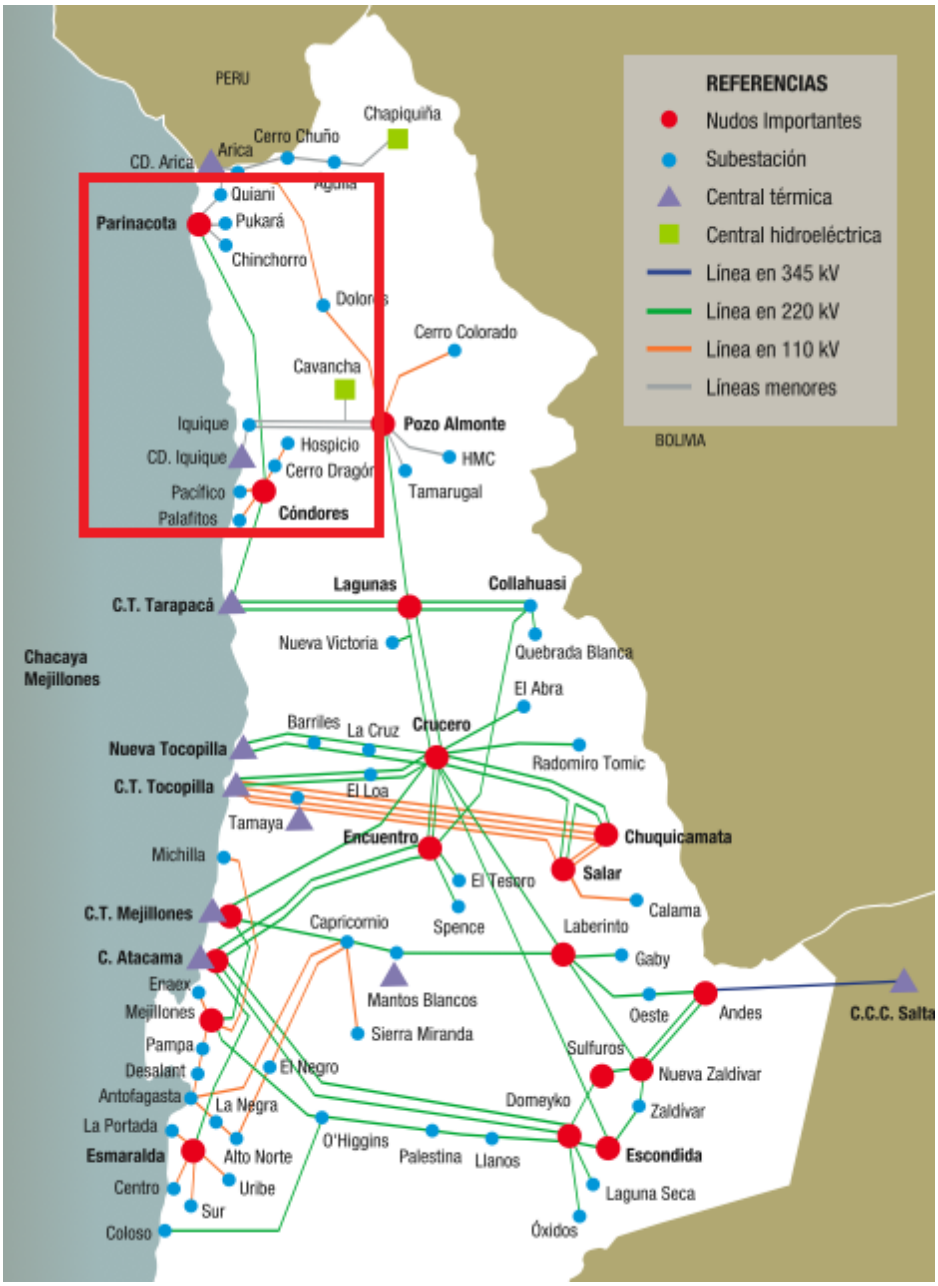


Figura 3.1: Sistema Interconectado del Norte Grande

La línea cuenta con una extensión de 222 km y 524 estructuras, de las cuales la primera (número 1) se encuentra en las proximidades de la ciudad de Iquique, en la región de Tarapacá y la 524 en Arica, en la región de Arica y Parinacota.

3.1.1. Clima y condiciones de contaminación

Según la norma IEC 815 y la CIGRE, el ambiente al que está expuesta la línea 1x220 Cóndores - Parinacota se considera con un nivel de contaminación “muy alto” [14], asignándole el valor más alto a la

distancia de fuga mínima entre todos los niveles de contaminación (31 mm/kV).

En su documento 158 [1], la CIGRE define a este ambiente como mixto, ya que mezcla características marinas y desérticas las cuales se explican a continuación:

- Ambiente marino: Áreas donde la contaminación sobre el aislador es dominada por la presencia del mar. Los agentes contaminantes presentes en el aislador son generalmente NaCl y otras sales marinas que son altamente solubles. Sobre un aislador cercano a la costa, los contaminantes inertes (no solubles) son muy bajos.

- Ambiente desértico: En este tipo de ambientes, la contaminación suele estar basada en arena. Estas arenas desérticas pueden contener altas cantidades de sal, lo que resulta en una capa altamente conductora cuando esta se humedece.

Una imagen georeferenciada de la línea, obtenida con el software de gestión de activos "SAP", se muestra en la figura 3.2.

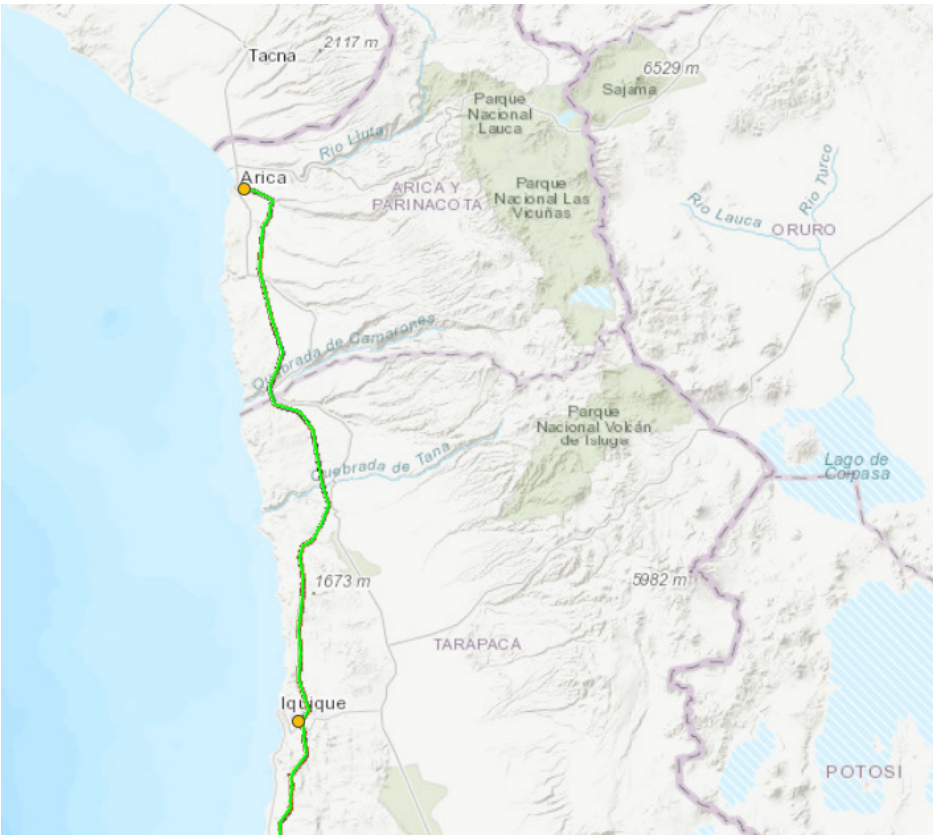


Figura 3.2: Ubicación georeferenciada de la línea 1x220 Cóndores - Parinacota

Como se puede observar, esta línea corre paralela a la costa entre las subestaciones Cóndores y Parinacota, a pocos kilómetros del océano Pacifico con las características de contaminación antes mencionadas.

3.1.2. División en secciones

Basados en estudios previos y en la experiencia de mantenimiento durante los años la línea ha sido separada en diferentes secciones. Los tramos y las estructuras que abarcan se muestran sobre la tabla 3.1.

Sección	Estructuras
1	001 - 018
2	019 - 030
3	031 - 279
4	280 - 293/418 - 428
5	294 - 316
6	317,318,328,329
7	319 - 327
8	330 - 417
9	429 - 455
10	456 - 489
11	490 - 524

Tabla 3.1: Secciones de la línea 1x220kV Cóndores - Parinacota

La empresa explica que las diferentes secciones fueron seleccionadas considerando niveles de contaminación similar y logística [1].

Se han identificado los sectores más críticos tanto en logística como en niveles de contaminación. La quebrada camarones, figura 3.3, es un sector en el cual se configuran varios factores. La línea de transmisión la atraviesa en un punto complejo, con grandes pendientes, muy cerca del mar desde donde entran las corrientes de aire trayendo consigo partículas solubles que se pegan a los aisladores. La carretera 5-norte pasa muy cerca de la línea y el flujo continuo de vehículos levanta partículas de arena y sal del desierto. El fenómeno de la Camanchaca se hace presente en este sector, disolviendo partículas conductoras y empeorando aun más la contaminación. A todo esto se suma una complicada logística de mantenimiento lo que hace que el lavado tome mucho más tiempo en estas estructuras (317 - 319) que en las del resto de la línea.

[1] En este contexto, logística similar quiere decir accesos similares, estudios de prevención de riesgos similares, materiales necesarios similares, etc. Lo que hace más práctico el realizar estas actividades de mantenimiento para un grupo de estructuras la misma jornada de trabajo

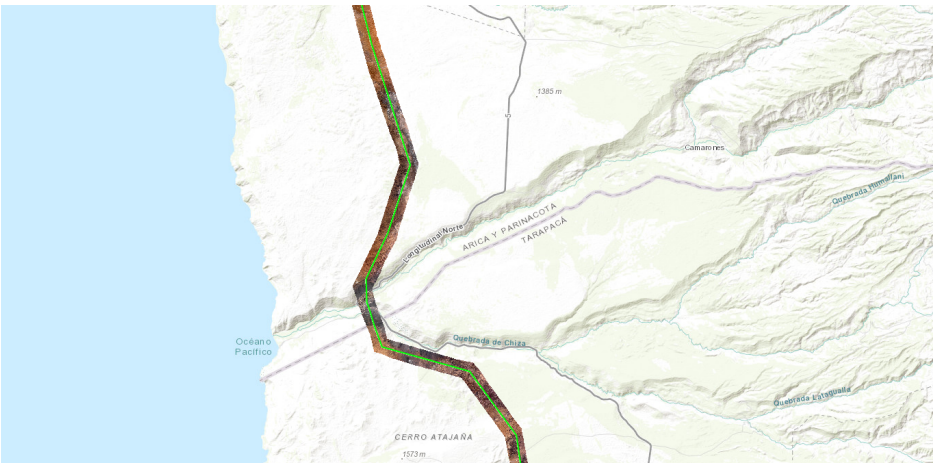


Figura 3.3: Quebrada Camarones

Este seccionamiento de la línea ha traído consigo diferentes acciones que han sido tomadas a lo largo del tiempo y sobre todo en los últimos años. Se han variado las frecuencias del lavado de aisladores dependiendo de la criticidad de las secciones, se han realizado ensayos de resistencia, efecto corona y termografías, se realizan inspecciones visuales y se ha planificado el cambio de los aisladores de vidrio presentes en algunas partes de la línea por aisladores siliconados (también llamados poliméricos) con una mayor resistencia contra la polución. Todas estas medidas se explican con algo más de detalles en la sección 3.2.1.

3.2. Disponibilidad de datos y plan actual de mantenimiento

Para proponer un modelo de mantenimiento es necesario realizar un análisis exhaustivo de los datos disponibles y la calidad de estos para su inclusión dentro de un modelo. De esto dependerá la robustez y la forma de calcular un intervalo de mantenimiento óptimo basado en los datos.

Para obtener los datos se contactó directamente a la oficina de la zona norte de Transelec, la cual esta en contacto constante con la línea de transmisión 1x220 kV Cóndores - Parinacota y se encargan de la logística y de la planificación de sus mantenimientos.

Los datos sobre el mantenimiento de esta línea de transmisión son los que la empresa ha guardado durante los años 2012 - 2017. Los datos se exponen en la subsección siguiente

3.2.1. Datos sobre el plan de mantenimiento actual

Según el plan de mantenimiento informado por Transelec y detallado en la figura 3.4:

L.220kV CONDORES-PARINACOTA																
ACTIVIDAD	TRAMO	PER.	CANT.	UNIDAD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
LAVADO DE AISLACION	19 a 30	2M	39	CADENAS	✓		✓		✓		✓		✓		✓	
LAVADO DE AISLACION	31 a 279	6M	846	CADENAS				✓						✓		
LAVADO DE AISLACION	294 a 316	2M	71	CADENAS	✓		✓		✓		✓		✓		✓	
LAVADO DE AISLACION	319 a 327	2M	7	CADENAS	✓		✓		✓		✓		✓		✓	
LAVADO DE AISLACION	330 a 417	6M	286	CADENAS	✓						✓					
LAVADO DE AISLACION	280-293 / 418 a 428	2M	94	CADENAS		✓		✓		✓		✓		✓		✓
LAVADO DE AISLACION	429 a 455	6M	87	CADENAS		✓						✓				
LAVADO DE AISLACION	456 a 489	4M	116	CADENAS	✓				✓				✓			
LAVADO DE AISLACION	490 a 524	2M	160	CADENAS	✓		✓		✓		✓		✓		✓	
LIMPIEZA DE AISLACION LLVV	~~317, 318, 328, 329~~	2M	12	CADENAS	✓		✓		✓		✓		✓		✓	
INSP. VISUAL COMPLETA			225	Km				✓				✓				
INSP. VISUAL EXHAUSTIVA			23	Km												✓
VERIFICACION RESISTENCIA MPT			16	ESTR.						✓						
INSP. TERMOGRAFICA			6	ESTR.									✓			
MEDICION EFECTO CORONA	317, 318, 328, 329	2M	12	CADENAS		✓		✓		✓		✓		✓		✓

Figura 3.4: Plan de mantenimiento actual, línea 1x220 kV Cóndores - Parinacota

1. Lavado de aisladores: Este lavado se realiza estructura por estructura a lo largo de la línea de transmisión desde la estructura 001 hasta la estructura 524. Se utiliza un camión cisterna y una pitón, elemento parecido a una vara que expulsa agua a presión por un extremo. El lavado se hace generalmente con la línea energizada y tiene una frecuencia de entre dos y seis meses dependiendo de la sección de la línea. Son el mantenimiento principal que recibe la línea contra el problema de la contaminación.

   - Se cuentan con los informes de lavado de aisladores entre los años 2012 y 2017

2. Limpieza de aisladores: Se realiza en algunas de las estructuras más problemáticas, según lo muestra el plan de mantenimiento actual en la figura 3.4. La limpieza se realiza con pértigas y es un mantenimiento más exhaustivo que el lavado de aisladores normal.

   - Los informes de limpieza se encuentran incluidos dentro de los informes de lavado de aisladores entre los anos 2012 y 2017
   - Entre mediados del ano 2016 y mediados del ano 2017 se cambió este tipo de mantenimiento por el cambio de los aisladores de las estructuras 317, 318, 328 y 329 cada dos meses.

3. Inspección visual pedestre (IVP): Se divide en su versión completa y exhaustiva. La primera se realiza sobre toda la extensión de la línea. La segunda, solo se realiza en las estructuras más problemáticas, 317, 318, 328 y 329 por ejemplo. En este tipo de inspección se recorre la línea por tierra, notando e informando los problemas que se presenten como contaminación, falta de señalizaciones, problemas en los accesos, etc.

   - Se tienen los datos de las IVP de los años 2014, 2015 y 2017.
   - El plan de mantenimiento actual (figura 3.4) menciona periodicidades de dos y una vez por año, las cuales no se realizan de esta forma regularmente.

4. Verificación resistencia MPT: Se realiza en las estructuras más problemáticas en cuanto a contaminación. Se mide la resistencia de los aisladores para comprobar su estado.

   - No se cuenta con los datos de estas inspecciones.

- Dentro de las inspecciones se consideran solo algunas estructuras (16). Idealmente se deberían considerar estas inspecciones dentro del cálculo, pero al ser pocas estructuras dentro del total y a la imposibilidad de contar con los datos, estas inspecciones no se tomarán en cuenta

5. Inspección termográfica: Se realiza sobre las estructuras más problemáticas de la línea y se tratan de inspecciones térmicas que ayudan a comprobar el estado de la aislación.

   - Sólo se cuenta con los datos de estas inspecciones para los anos 2013, 2014, 2015 y 2016.
   - Se desconoce si se realizó este tipo de inspección durante los otros años, por lo que se integran solo los datos existentes dentro del cálculo.

6. Coronografías: Es un tipo de inspección que se realiza en las estructuras más problemáticas y que mide el efecto corona para conocer el estado de la aislación.

   - Sólo se cuenta con los datos de estas inspecciones para el año 2017.
   - Se asumirá una periodicidad igual a la del 2017 para los años 2012-2016 según la recomendación de la empresa para los efectos del cálculo.

Por otra parte, fuera del plan de mantenimiento actual de Transelec, se consideran otros eventos enumerados a continuación.

1. Fallas: En el sitio web del Coordinador Eléctrico Nacional (CEN) se informan las fallas ocurridas en todo el sistema eléctrico y reúne también los informes de los sistemas antiguos SING y SIC. Se recuperaron las fallas de la línea Cóndores - Parinacota entre los años 2012 - 2017. Los informes de falla cuentan con informes de cada empresa a la cual sus activos fueron afectados, los motivos (cuando son conocidos), los tiempos de la falla y otras informaciones relevantes.

   - No se conoce la ubicación exacta y el motivo exacto para todas las fallas informadas
   - La totalidad de los informes están disponibles en el sitio web del CEN

2. Reemplazo de aisladores: Para algunas de las estructuras consideradas como críticas por Transelec (317, 318, 328 y 329), el lavado periódico fue reemplazado por un intercambio de aisladores de vidrio periódico entre mediados del año 2016 hasta el 2017.

3. Reemplazo por aisladores poliméricos: La empresa considera el reemplazo de algunas partes de la línea, consideradas como las más problemáticas por temas de logística, accesibilidad y tasa de fallas, por aisladores poliméricos. Dada las diferencias en el mantenimiento entre aisladores poliméricos y de vidrio, las cadenas reemplazadas por aisladores poliméricos no se consideraran dentro de este nuevo plan de mantenimiento. Las estructuras afectadas por este reemplazo son (Tabla 3.2):

Sección	Estructuras siliconadas/poliméricas
1	001 - 018
2	019 - 030
3	0
4	0
5	316
6	317,318,328,329
7	319 - 327
8	0
9	0
10	0
11	0

Tabla 3.2: Reemplazo por aisladores siliconados

- Este reemplazo ha comenzado a mediados del 2017 y se espera termine en el 2018

3.3. Modelo de mantenimiento propuesto: Optimización de la frecuencia de inspecciones

Se ha definido que el plan de mantenimiento que mejor aprovecha los datos disponibles es el que calcula el intervalo óptimo de inspecciones. La optimización se lleva a cabo con datos de mantenimiento preventivo y correctivo histórico tomando en cuenta sus costos, periodicidades y las fallas ocurridas en el activo. El sustento teórico ha sido tomado de las clases del profesor Rodrigo Pascual del "Laboratorio de Gestión de Activos UC" del departamento de Ingeniería de Minería de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

3.3.1. Planteamiento del problema

A continuación se presentan todas las variables del problema de optimización para el modelo de mantenimiento.

- **Parámetros** El modelo debe tener en cuenta los siguientes parámetros:
  - Tasa media de fallas $\lambda(f_i)$: Representa la cantidad de fallas del activo en función de la frecuencia de inspecciones. Para obtener esta función, debe realizarse una regresión matemática basada en los datos de falla y de inspecciones.
    - $MTBF = 1/\lambda(f_i)$ $[ut]$[2]
  - Tiempo de reparación: Es el tiempo que se toma en aclarar o solucionar un evento de falla.
    - $MTTR$ $[ut]$
  - Duración de inspección: Es el tiempo promedio que se tarda en realizar una inspección/intervención preventiva
    - $MTTI$ $[ut]$

[2]ut: Unidad de tiempo

- Costo de falla: Costo promedio provocado por las fallas del activo. Puede ser respecto a sanciones o a un costo de oportunidad de ganancias no recibidas por la falla.
  - c_f $[um/ut]$ [3]
- Costo de inspección/intervención: Costo promedio asociado a las inspecciones/intervenciones del activo. Este costo debe incluir los diferentes tipos de mantenimiento sobre el activo.
  - $C_{i,i} = c_{i,i} MTTI$ $[um]$
- Costo de intervención de las reparaciones: Costo asociado a las reparaciones luego de que existió un evento de falla.
  - $C_{i,r} = c_{i,r} MTTR$ $[um]$

- **Variable de decisión**: Es la variable que se quiere optimizar. En los métodos de optimización clásicos, es la variable por la cual se deriva para encontrar los máximos y mínimos. Se busca realizar una optimización de la frecuencia de las actividades de inspección.
  - Frecuencia de inspecciones: Es esta variable la que se necesita optimizar. En base a los resultados de frecuencia de inspecciones óptima se realizara un nuevo plan de mantenimiento.
    - f_i $[1/ut]$
- **Objetivo:** Se buscan los siguientes objetivos dependiendo si se busca un costo global mínimo o una disponibilidad máxima del activo.
  - **Costo global mínimo:** Se busca optimizar la frecuencia de inspecciones para minimizar el costo global del nuevo plan de mantenimiento. Se deben tomar en cuenta los costos de cada tipo de acción, tanto de falla como de mantenimiento.
  - **Disponibilidad máxima**: Los costos de las operaciones de mantenimiento y los costos directos e indirectos de falla no se toman en cuenta. La frecuencia de inspecciones se optimiza para maximizar la disponibilidad del activo.
- **Función de optimización:** A continuación se plantea la ecuación que toma en cuenta todas las variables para su optimización.
  - Costo por mantenimiento correctivo (ocurrida una falla): Este ítem depende del costo asociado a la falla del activo (c_f) y a los costos de mantenimiento correctivos ($c_{i,r}$), a la tasa media de falla ($\lambda(f)$) en función de la frecuencia y al tiempo medio de aclaramiento/reparación de la falla. El producto entre la tasa media de fallas ($\lambda(f)$) y el tiempo medio de reparación ($MTTR$) se conoce también como la indisponibilidad del activo D_C. Esta indisponibilidad es un valor adimencional que representa el porcentaje de tiempo en el que el activo se encuentra fuera de servicio. Esta relación se ve representada en la ecuación 3.1.

$$(c_f + c_{i,r}) \cdot \lambda(f) \cdot MTTR = (c_f + c_{i,r}) \cdot D_C(f) \tag{3.1}$$

  - Costo por mantenimiento preventivo e inspecciones: Aquí caben todas las inspecciones y mantenimientos realizados de manera preventiva. Se incluyen los costos de mantenimiento e inspección ($c_{i,i}$), los costos de falla producto de una posible detención del activo a causa del mantenimiento (c_f), la frecuencia de inspección (f) y el tiempo medio para realizar una inspección/mantenimiento

[3] um: Unidad monetaria

($MTTI$). Para el caso de las inspecciones el producto entre la frecuencia de mantenimiento y el tiempo medio de mantenimiento se conoce como D_i y representa un tipo de indisponibilidad. D_i es adimencional y se traduce como el porcentaje de tiempo en el que el activo se encuentra bajo intervención. La relación de lo mencionado se muestra en la ecuación 3.2:

$$(c_f + c_{i,i}) \cdot f \cdot MTTI = (c_f + c_{i,r}) \cdot D_I(f) \tag{3.2}$$

- **Expresión de optimización final**
  - Los costos globales ($c_g(f)$) se expresan en la ecuación (3.3) y le optimización se lleva a cabo realizando una derivada con respecto a la frecuencia (f) (ecuación (3.4)).

$$C_g(f) = (c_f + c_{i,r}) \cdot \lambda(f) \cdot MTTR + (c_f + c_{i,i}) \cdot f \cdot MTTI \tag{3.3}$$

$$\frac{dC_g(f)}{df} = \frac{d\lambda(f)}{df} \cdot (c_f + c_{i,r}) \cdot MTTR + (c_f + c_{i,i}) \cdot MTTI \tag{3.4}$$

  - La máxima disponibilidad se logra optimizando la misma ecuación (3.3) pero sin incluir los costos. Realizando esto, la ecuación queda expresada en base a variables de porcentajes de indisponibilidad, lo que da como resultado una en la ecuación que minimiza estos porcentajes de indisponibilidad global (D_g), es decir, que maximiza la disponibilidad del activo minimizando su indisponibilidad D_C y D_I (ecuación (3.5) y (3.6)).

$$D_g(f) = \lambda(f) \cdot MTTR + f \cdot MTTI \tag{3.5}$$

$$\frac{dD_g(f)}{df} = \frac{d\lambda(f)}{df} \cdot MTTR + MTTI \tag{3.6}$$

3.3.2. Datos

Para realizar la optimización de la frecuencia de mantenimiento hace falta tener los datos de frecuencia y tiempos de mantenimiento, frecuencias y tiempos de falla y los distintos tipos de costos asociados a cada evento. Los datos disponibles en cada empresa varían en su forma de ser guardados, en su cantidad y en su calidad. Para desarrollar un modelo como el de intervalo óptimo de frecuencias de inspección (o cualquier otro) es necesario tener una cierta cantidad y calidad de datos. Estos datos deben recuperarse y ordenarse para obtener los valores representativos de inspecciones, costos y fallas expuestos en la sección 3.3.1.

A continuación se muestran los datos que han sido obtenidos desde la empresa. Estos datos son los obtenidos con respecto al plan de mantenimiento actual y las variables que se han guardado de cada evento son, en algunos casos, limitadas.

Calidad de los datos obtenidos

Como los tipos de datos obtenidos se exponen en la sección 3.2, en esta sección se explicará la calidad de estos. Con calidad se refiere a la cantidad de variables guardadas de un evento como el tiempo que toma realizarlo, el costo, la diferenciación entre las diferentes estructuras, etc.

1. Lavado y limpieza de aisladores: Estos informes presenta los eventos de lavado y limpieza entre, los anos 2012 y 2017 y los datos son presentados en forma de lista. En cada fila se presenta:
   - Fecha del trabajo de lavado y limpieza,

- las estructuras y cadenas de aisladores intervenidas,
- tiempo de inicio y final de los trabajos en aquella jornada,
- comentarios sobre la jornada.

Un ejemplo de informe de lavados se presenta en los anexos (Figura 5.1).

2. Inspección visual pedestre (IVP): Estos informes se presentan en formato de archivo Excel para los años 2013, 2014, 2015 y 2016. Cada fila presenta información sobre la estructura de la línea inspeccionada con otras informaciones como:

   - Identificación sobre que parte del activo se encuentra bajo problemas (aisladores, accesos, señalizaciones, etc),
   - tipo de problema detectado en las estructuras (contaminación, rotura, etc),
   - otras informaciones respecto al activo y
   - la hora en la cual se realizo la inspección.

   Un ejemplo de informe IVP se presenta en los anexos (Figura 5.2).

3. Verificación de resistencia MPT: No fue posible obtener los informes de mantenimiento de este ítem. No se cuenta tampoco con estimaciones sobre este tipo de mantenimiento.

4. Inspección termográfica: Son informes presentados en formato de lista con la fecha de realización de la inspección. Los datos presentes en los informes son:

   - Estructura inspeccionada,
   - hora de inicio de la inspección,
   - datos arrojados referentes al ensayo realizado,
   - identificación detallada del activo inspeccionado,
   - estado del activo y otras informaciones concernientes a la inspección.

   Un ejemplo de informe de termografía se presenta en los anexos (Figura 5.3).

5. Coronografías: Estos informes se presentan de una forma similar a los de termografías. Sólo se tiene acceso a las inspecciones realizadas en el año 2017. Se presentan datos de:

   - Información sobre la estructura inspeccionada,
   - Hora de inicio de la inspección y
   - datos del ensayo mismo.

   Un ejemplo de informe de coronografía se presenta en los anexos (Figura 5.4).

6. Fallas: Estos informes no provienen directamente de Transelec. Estos datos están incluidos como aviso de falla dentro del sistema SAP de gestión de activos de la empresa. Se han elegido utilizar los informes del CEN gracias a su mejor organización y la facilidad de acceso a ellos.

   En un evento de falla en el sistema eléctrico nacional, un informe es elaborado sumando los informes de cada una de las empresas afectadas por esta falla a nivel de transmisión eléctrica. Los informes indican la línea afectada pero rara vez indican la estructura especifica en donde ocurrió la falla. Se analizaron todos los informes de falla ocurridos entre los años 2012 - 2017 para encontrar en los cuales se veía afectada la línea 1x220 Cóndores - Parinacota. En los informes de falla se indica:

- La línea de transmisión en donde ocurrió la falla,
- el motivo de la falla (cuando este es conocido),
- la estructura afectada dentro de la línea de transmisión (cuando esta es conocida),
- fecha y hora de comienzo y aclaramiento de la falla (cuando no se encuentra la información textual, esta puede ser deducida desde el mismo informe) y
- las cargas desconectadas y las acciones ejecutadas luego de la falla.

Dada la extensión de estos informes, no se incluyen ejemplos en esta memoria. Los informes fueron en la pagina web del CEN https://www.coordinador.cl/

7. Reemplazo de aisladores: No se poseen informes de reemplazo de aisladores en mal estado. Sin embargo, se recomendó por parte de la empresa considerar un reemplazo periódico cada dos meses de los aisladores de las estructuras 317, 318, 328 y 329 entre mediados de 2016 y 2017.

8. Reemplazo por aisladores siliconados: Consta de un solo informe en donde se indica:

   - Aisladores de estructuras problemáticas a nivel de contaminación que se reemplazaran por aisladores siliconados,
   - estado (si ya se han cambiado o no) y
   - la fecha tentativa de los cambios que aún no se han realizado.

   Este informe se muestra en la figura 5.5

Datos deseables e hipótesis sobre los datos

Conociendo los datos a disposición se ha elegido un método que los utiliza mejor para poder llegar a un nuevo plan optimizado de mantenimiento. Se conoce ahora también la calidad de los datos gracias a lo expuesto en la subsección anterior. Ahora es el momento de revisar, teniendo los datos y conociendo su calidad, de que forma se aplicará el método, ajustándolo a la calidad de los datos y tomando hipótesis sobre estos cuando haga falta. De esta forma se fija un objetivo y se puede finalmente comenzar a trabajar sobre le modelo.

A continuación se lleva a cabo una comparativa entre los datos y su calidad óptima para aplicar al modelo y los datos que se tienen. En los casos en donde esta calidad de datos no es la esperada algunas hipótesis serán planteadas. Al final de este análisis, se tendrá una idea más aterrizada de como se buscará crear el nuevo modelo de mantenimiento.

1. **Seccionamiento de la línea**: Basados en la experiencia y en el conocimiento en terreno sobre la línea Cóndores - Parinacota, Transelec ha seccionado la línea para efectos de mantenimiento. Se han agrupado las estructuras con características similares de contaminación, accesos, tipos de mantenimiento y logística de mantenimiento según se muestra en la figura 3.4. Gracias a esto, se les asigna distintas periodicidades a cada sección y distintos tipos de mantenimiento, sobre todo, para las secciones más problemáticas. Con esta información se hará lo siguiente.

   - Confiando en la experiencia de Transelec, se mantendrá el mismo seccionamiento de la línea considerando de que se tienen necesidades similares dentro de cada grupo de estructuras.
   - Las periodicidades presentadas para cada tipo de mantenimiento y sección (figura 3.4) son las que se compararan con las nuevas periodicidades propuestas al final de este trabajo.

- No se buscaran las mismas proporciones entre las periodicidades mostradas en la figura 3.4, las nuevas periodicidades vendrán dadas por los datos de mantenimiento recopilados.

2. **Tasa media de fallas en función de la frecuencia de inspeccion** $\lambda(f)$: La incidencia de las fallas en el activo "Línea 1x220kV Cóndores - Parinacota" es bastante bajo, pero cada una de estas fallas tiene efectos en una cantidad importante de consumidores controlados y no controlados. Se cuenta un numero total de 10 fallas en la línea Cóndores - Parinacota entre los años 2012 y 2017 (menos de dos fallas en promedio por año).

   El caso ideal, es que en cada informe de falla se indiquen tanto la causa como la ubicación exacta donde esta ocurrió. Sin embargo, sólo en algunos de los informes de falla se incluyen todos los datos necesarios, pero en todos se conoce o se puede inducir la hora de comienzo y aclaramiento de la falla. Se conoce también que la falla fue en la línea Cóndores - Parinacota aunque no se sepa su localización especifica dentro de la línea.

   - Se tomarán en cuenta todos los eventos de falla de los informes, incluso los cuales no tengan una ubicación o un motivo totalmente claro. Se toma esta hipótesis pensando en que si las fallas no son a causa de contaminación, estas podrían ser detectadas con una inspeccion visual terrestre, la cual se integrará en el modelo final de mantenimiento.
   - En vez de conocer la tasa media de fallas en cada una de las secciones de la línea como seria lo ideal, se encontrara la tasa media de fallas para toda la línea. Esto llevara a encontrar una periodicidad promedio optima para la línea en general, la cual se traducirá proporcionalmente en periodicidades diferentes para cada sección tomando en cuenta el historial de mantenimiento de la línea y por sección entre los anos 2012 y 2017.

3. **Tiempos de reparación/aclaramiento (MTTR: Mean time to repare)**: Se obtendrán directamente de los informes de falla tomando en cuenta la hora de inicio y de aclaramiento de la falla. Los datos recabados son los deseables para este indicador MTTR.

4. **Duración de inspección (MTTI: Mean time to inspectionate)**: Es importante tomar en cuenta ciertas hipótesis en este apartado. Idealmente se deben tener los tiempos medios de inspección para cada tipo de inspeccion de la línea, pero en este caso sólo se pueden calcular los tiempos medios con los datos de los informes de lavado de aisladores. Para los informes de IVP, termografías, coronografías e intercambio/reemplazo de aisladores sólo se tienen los horarios de inicio de la inspección. Sin embargo, debido a que las IVP, coronografías y termografías se realizan en pocas estructuras de la línea el MTTI de estas se puede despreciar. Las IVP no solo inspeccionan el estado de los aisladores, por lo que el tiempo también se puede despreciar al ser solo una inspeccion visual. Por el contrario, los lavados de aisladores se llevan la gran mayoría del MTTI total. Entonces:

   - Se tomará para el modelo el tiempo medio de inspección (MTTI) solamente del mantenimiento "lavados de aisladores" ya que representa a prácticamente la totalidad del tiempo de inspeccion de la línea. Se asume que los otros tipos de mantenimiento se realizan con mucha menor frecuencia y en intervalos de tiempo más cortos. Es necesario realizar esta suposición ya que los tiempos de ejecución de los otros mantenimiento no se conocen pero se saben más cortos que el tiempo invertido en lavados.
   - Como se tienen los tiempos diarios de trabajo y no por cada estructura se asume un tiempo igual para cada estructura lavada en un día. Se espera que los MTTI por estructura se ajusten automáticamente con el volumen de datos recabados.

5. **Costos de falla**: Los costos de falla como multas, costo de oportunidad perdido, etc, no pudieron ser encontrados. Se consideró en un principio tomar este costo como un factor del costo de mantenimiento, pero hacer eso sin conocer los valores reales se traduciría en grandes variaciones en el nuevo plan de mantenimiento. Para realizar esta hipótesis, se realizaron cálculos con diferentes valores de costos de falla con variaciones muy grandes por lo que se tomo esta decisión. Entonces:

   - Ya que los costos de falla no son conocidos, se optará por una maximización de la disponibilidad de la línea Cóndores - Parinacota y no por una minimización de los costos de mantenimiento. Esto también se corresponde con la inexistencia de una línea en paralelo, lo que relega los costos de mantenimiento a una segunda posición y le entrega una máxima importancia a la disponibilidad del suministro eléctrico.

6. Costos de inspección/reparación: Los costos de las operaciones han sido recabados directamente desde Transelec y otros proveedores. Si se tomara una minimización de costos de mantenimiento podrían ser incluidos sin problemas. La utilización de estos datos será para lo siguiente:

   - Los costos de mantenimiento serán utilizados para comparar los costos del plan de mantenimiento actual con el plan de mantenimiento propuesto por este trabajo.

Conociendo ahora la forma en la que se utilizarán los datos recabados, se puede comenzar con el desarrollo del modelo.

3.4. Desarrollo del modelo

Para resumir, dados los datos que se tienen a disposición, se buscará encontrar una periodicidad para toda la línea la que luego traducirá proporcionalmente a una periodicidad para cada sección. Para esto, se toma como base el historial de mantenimientos entre 2012 - 2017.

3.4.1. Elección de una base de tiempo

El volumen de datos recabados es bastante grande y hace falta escoger una base de tiempo para su análisis. Por una parte, se tienen datos de mantenimiento que permiten tener una base temporal bastante corta (de un mes si se quisiera) con presencia de mantenimientos en cada una de esos espacios temporales. Por otro lado, se tiene una tasa promedio de fallas de menos de dos fallas por año, por lo que si se tomara esta base temporal corta, existirían demasiados periodos sin ninguna falla, lo que afectaría para encontrar una función de tasa media de fallas en función de la frecuencia de inspecciones $\lambda(f)$.

Dado que el plan actual de mantenimiento es de un año (como se presenta en la planificación actual de la figura 3.4), se estima que una buena base temporal para el análisis de los datos de mantenimiento y fallas es de un semestre (6 meses). De esta forma se posee una cantidad aceptable de datos para la futura aproximación de la tasa de fallas $\lambda(f)$. Los datos se organizarán dentro de la tabla 3.3.

	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografías	Termografías	Siliconado	Inspecciones	Fallas
1/2012								
2/2012								
1/2013								
2/2013								
1/2014								
2/2014								
1/2015								
2/2015								
1/2016								
2/2016								
1/2017								
2/2017								

Tabla 3.3: Organización de datos por semestres

Esta tabla resumirá las frecuencias de cada tipo de inspección para cada semestre, las cuales se resumirán en la columna "inspecciones" para realizar la regresión que hará posible conocer la tasa media de fallas $\lambda(f)$.

Finalmente, como lo que se busca es comparar el plan actual con el nuevo plan generado basado en los datos de mantenimiento, incluso si los datos están ordenados en base a semestres, los trabajos estadísticos y de optimización son realizados en base a meses.

3.4.2. Frecuencias de inspección

El plan de mantenimiento actual se presenta en forma de periodicidades (figura 3.4), que es lo mismo que decir la cantidad de tiempo en el que la sección entera debe ser inspeccionada. Se busca entregar un resultado con el mismo formato, para eso, se suma la totalidad de las inspecciones realizadas por cada estructura dentro de un "intervalo de estructuras", este numero total de inspecciones individuales se divide por la cantidad de estructuras de la sección entregando como resultado la cantidad promedio de veces en la que la sección entera fue inspeccionada durante un periodo de tiempo. Existe el problema de que si la mitad de la línea fue inspeccionada dos veces, el resultado será que la línea en promedio fue inspeccionada una vez, pero al analizar los datos se concluyó de que los mantenimientos eran bien homogéneos dentro de cada sección, por lo que esta es una aproximación bastante certera de lo que ocurrió como mantenimiento.

Al haber ya organizado los datos por semestre y por sección de la línea, se debe conocer la frecuencia de inspeccion para toda la línea en general. Como se sabe, existen secciones de 249 estructuras como de solo 4 estructuras, por lo tanto no es posible sumar directamente los valores de inspección obtenidos por sección. Se toma entonces un factor llamado "Peso", que no es más que una proporción de la cantidad de estructuras de una sección respecto del total de estructuras de la línea.

Los etapas mencionadas anteriormente se deben realizar para cada uno de los tipos de inspecciones. A continuación se muestran las diferentes organizaciones intermedias de los datos para luego dar paso a la organización final buscada.

Lavado de aisladores

Para comenzar, se traspasan a una planilla Excel todos los datos de lavados por año en el formato mostrado en la figura 3.5.

	A	B	C	D	E	F	H	I
1	Dia	Hora inicio	Hora termino	Estructuras	N Estructuras	N Cadenas	t x Estructura	t x Cadena
2	18/12/2012	08:04:00	12:45:00	418,419,420,421,422,423,424,425,426,427,428	11	42	00:25:33	00:06:41
3	27/12/2012	07:45:00	12:10:00	316,320,321,322,326	5	27	00:53:00	00:09:49
4	12/11/2012	08:00:00	15:12:00	001,002,003,004,005,006,007,008,009,010,011,012,013,014,015,0	17	70	00:25:25	00:06:10
5	13/11/2012	07:55:00	16:01:00	019,020,021,022,023,024,025,026,027,028,029,030	12	39	00:40:30	00:12:28
6	31/10/2012	08:07:00	15:12:00	213,214,215,216,217,218,219,220,221,222,223,224,225,226,227,2	26	87	00:16:21	00:04:53
7	22/10/2012	08:34:00	11:45:00	238,239,240,241,242,243,244,245	9	24	00:21:13	00:07:57
8	23/10/2012	08:38:00	15:00:00	246,247,248,249,250,251,252,253,254,255,256,257,258,259,260,2	24	78	00:15:55	00:04:54
9	24/10/2012	07:55:00	15:23:00	270,271,272,273,274,275,276,277,278,279,280,281,282,283,284,2	27	94	00:16:36	00:04:46
10	25/10/2012	08:12:00	16:01:00	297,298,299,300,301,302,303,304,305,306,307,308,309,310,311,3	19	62	00:24:41	00:07:34
11	10/10/2012	08:34:00	16:00:00	031,032,033,034,035,036,037,038,039,040,041,042,043,044,045,0	22	72	00:20:16	00:06:12
12	11/10/2012	08:22:00	15:15:00	053,054,055,056,057,058,059,060,061,062,063,064,065,066,067,0	18	57	00:22:57	00:07:15
13	12/10/2012	08:31:00	14:28:00	071,072,073,074,075,076,077,078,079,080,081,082,083,084,085,0	22	72	00:16:14	00:04:57
14	16/10/2012	08:44:00	13:56:00	093,094,095,096,097,098,099,100,101,102,103,104,105,106,107,1	18	60	00:17:20	00:05:12
15	17/10/2012	08:23:00	13:56:00	111,112,113,114,115,116,117,118,119,120,121,122,123,124,125,1	20	72	00:16:39	00:04:38
16	19/10/2012	08:34:00	14:28:00	131,132,133,134,135,136,137,138,139,140,141,142,143,144,145,1	25	84	00:14:10	00:04:13
17	29/10/2012	09:15:00	15:15:00	156,157,158,159,160,161,162,163,164,165,166,167,168,169,170,1	30	107	00:12:00	00:03:22
18	30/10/2012	08:01:00	15:19:00	186,187,188,189,190,191,192,193,194,195,196,197,198,199,200,2	27	100	00:16:13	00:04:23
19	28/09/2012	08:48:00	11:44:00	316,320,321,322,326,319	6	32	00:29:20	00:05:30
20	10/09/2012	08:32:00	17:05:00	456,457,458,459,460,461,462,463,464,465,466,467,468,469,470,4	24	78	00:21:22	00:06:35
21	12/09/2012	08:15:00	14:30:00	480,481,482,483,484,485,486,487,488,489,490,491,492,493,494	15	74	00:25:00	00:05:04
22	11/09/2012	07:48:00	13:45:00	495,496,497,498,499,500,501,502,503	9	43	00:39:40	00:08:18
23	10/09/2012	08:32:00	17:05:00	504,505,506,507,508,509,510,511,512,513,514,515,516,517,518,5	21	81	00:24:26	00:06:20

2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | Estructuras

Figura 3.5: Traspaso de datos de lavados a una planilla

Estos son los datos brutos obtenidos de los informes. Se separaron en una primera instancia todos los informes por año entre 2012 - 2017. Dentro de los datos se encuentra la hora de inicio y término de la jornada de trabajos, las estructuras y la cantidad de cadenas de aisladores lavados. Adicionalmente se obtiene el tiempo de lavado por estructura y por cadena asignando el mismo tiempo para cada estructura ese día. Esta hipótesis ya fue explicada en la sección 3.3.2.

En este mismo archivo se programó una macro en visual-basic para organizar la cantidad de lavados por estructura. Esta macro permite tabular las estructuras lavadas, obtener el tiempo total de lavado, la cantidad de lavados y el tiempo unitario de lavado. Permite también separar los datos por año o por la totalidad de estos. Por ejemplo, en la figura, se organizan todos los lavados realizados el 2017 para todas las estructuras. Las macros programadas se encuentran en el anexo 5.6.

Luego de esto, se hicieron planillas en las que se tabularon todos los tiempos y lavados por año y por sección. En la figura 3.6 se muestra la tabulación realizada para la sección 001 - 018.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Estructura	Suma txEstructura	Suma txCadena	Total lavados	txEstructura	txCadena		2,00	05/01/2017	13/03/2017	08/05/2017	1,00
2	001	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
3	002	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
4	003	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
5	004	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
6	005	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
7	006	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
8	007	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
9	008	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
10	009	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
11	010	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
12	011	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
13	012	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00
14	013	1:07:21	0:17:49	3	0:22:27	0:05:56		2,00	X	x	x	1,00

2017 | 2016 | 2015 | 2014 | 2013 | 2012 | Todo

Figura 3.6: Ejemplo: Organización de lavados por sección

En esta organización y con ayuda de los datos brutos tabulados (figura 3.5, se ordenaron con su fecha de realización los lavados realizados individualmente sobre cada estructura. Esto permite conocer la cantidad de lavados realizados en cada semestre y sobre cada estructura para obtener un promedio de lavados realizados en esa sección.

Finalmente y en la misma planilla, se resumió todo esta organización por sección y por año en un resumen total por sección.

Este trabajo fue realizado para todas las secciones del plan inicial de mantenimiento de la figura 3.4, es decir para las secciones de la tabla 3.4.

Sección	Estructuras
1	001 - 018
2	019 - 030
3	031 - 279
4	280 - 293 y 418 - 428
5	294 - 316
6	317, 318, 328, 329
7	319 - 327
8	330 - 417
9	429 - 455
10	456 - 489
11	490 - 524

Tabla 3.4: Seccionamiento de la línea

Luego de la organización final por estructura y por semestre, se llevaron todos estos datos a la organización final de lavados. Para esto, se creo una nueva planilla (figura 3.7).

Mantenimientos	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017	Peso	Cant. Est
001-018	3,00	3,00	4,00	2,22	3,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	2,00	1,00	0,03	18
019-030	3,00	3,00	4,00	2,00	3,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	1,83	0,02	12
031-279	1,00	1,00	0,19	0,98	1,00	1,00	0,76	1,24	0,96	0,52	1,48	1,00	0,48	249
280-293/418-428	1,00	1,00	1,00	1,00	1,44	1,00	1,44	1,00	1,44	1,32	2,44	0,56	0,05	25
294-316	0,96	1,09	1,04	0,96	1,83	1,04	2,96	0,96	3,48	2,78	3,00	1,91	0,04	23
317,318,328,329	0,00	0,00	0,00	1,67	3,25	1,00	3,00	0,00	3,00	3,00	1,00	0,00	0,01	4
319-327	0,00	1,56	0,89	1,56	1,89	2,89	2,00	0,00	4,89	1,78	2,78	0,56	0,02	9
330-417	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,15	1,00	1,00	0,17	88
429-455	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	2,30	2,00	2,00	0,05	27
456-489	2,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	2,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,06	34
490-524	2,00	1,09	0,91	1,11	2,26	1,00	2,26	1,00	2,26	2,03	3,06	2,00	0,07	35
													1,00	524
	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017		
Resultado	1,22	1,13	0,77	0,91	1,35	1,15	1,35	1,20	1,50	1,23	1,77	1,21		

Figura 3.7: Organización final lavados

En esta planilla se recopilan todos los lavados promedio por sección y por semestre que vienen desde las organizaciones previas. Se incluye también la columna "Peso", que es la relación entre la cantidad de estructuras de la sección y la cantidad total de estructuras de la línea (Última columna de la derecha, figura 3.7).

Finalmente, para obtener el mantenimiento característico de la línea para cada semestre entre 2012 - 2017, se hace una suma ponderada de los mantenimientos por sección y por semestre y se tabula en la fila "Resultado" para el semestre correspondiente. Es esta fila la que se incluirá en la columna "Lavados" de la organización final de inspecciones de la tabla 3.3.

Para los demás tipos de inspeccion, se ha utilizado el mismo método de organización y prácticamente los mismos pasos intermedios dependiendo del volumen de datos con lo que se cuenta. Es por esto que en las secciones siguientes sólo se mostrarán las organizaciones finales de cada tipo de mantenimiento.

IVP

Los informes de inspección visual pedestre indican que han sido realizados en los años 2013, 2014, 2015 y 2016. La organización final de todos estos datos se observa en la figura 3.8[4].

[4]Para conocer los pasos intermedios para la organización de los datos, tomar como ejemplo el método seguido para los datos de lavado en la sección 3.4.2: "Lavado de aisladores"

Mantenimientos	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017	Peso	Cant. Est
						26-11-2014 A	14-04-2015 A	03-08-2015 A			01-04-2017 A	12-08-2017 A		
						10-12-2014 F		12-10-2015 A				20-11-2017 E		
								01-12-2015 R						
001-018						1,00	1,00	1,00			1,00	1,00	0,03	18
019-030						1,00	1,00	2,00			1,00	1,00	0,02	12
031-279						0,46	1,00	1,38			1,00	1,01	0,48	249
280-293/418-428						0,44	1,00	1,00			1,00	1,08	0,05	25
294-316						0,74	1,00	1,48			1,00	0,96	0,04	23
317,318,328,329						0,50	0,00	1,00			1,00	1,00	0,01	4
319-327						1,00	1,00	1,44			1,00	1,11	0,02	9
330-417						1,00	1,00	1,01			1,00	1,00	0,17	88
429-455						1,00	1,00	0,00			1,00	1,00	0,05	27
456-489						1,47	1,00	0,00			1,00	1,38	0,06	34
490-524						1,26	1,00	0,00			1,00	1,03	0,07	35
													1,00	524
	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017		
Resultado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,99	1,05	0,00	0,00	1,00	1,04		

Figura 3.8: Organización final Inspección Visual Terrestre

Estos valores se integrarán a la organización final de inspecciones al final de esta sección.

Reemplazo

Según la empresa, estos reemplazos de aisladores de vidrio se llevaron a cabo entre los semestres 2/2016 y 2/2017 cada dos meses. La organización final de estos datos se muestran en la figura 3.9[5].

Mantenimientos	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017	Peso	Cant. Est
001-018	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	18
019-030	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	12
031-279	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	249
280-293/418-428	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	25
294-316	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	23
317,318,328,329	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	2,00	1,00	0,01	4
319-327	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	9
330-417	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	88
429-455	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	27
456-489	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	34
490-524	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	35
													1,00	524
	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017		
Resultado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,01		

Figura 3.9: Organización final Reemplazo de aisladores de vidrio, estructuras 317, 318, 328 y 329

Estos valores se integraran a la organización final de inspecciones al final de esta sección.

Coronografías

Sólo se tiene el informe del año 2017. Se tomará esta frecuencia de mantenimiento para todos los años entre 2012 - 2017, asumiendo que en todos los años las inspecciones fueron al menos similares. Esto se ve

[5]Para conocer los pasos intermedios para la organización de los datos, tomar como ejemplo el método seguido para los datos de lavado en la sección 3.4.2: "Lavado de aisladores"

en el resumen general de los datos de coronografías de la figura 3.10[6].

Mantenimientos	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017	Peso	Cant. Est
001-018	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	18
019-030	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	12
031-279	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	249
280-293/418-428	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	25
294-316	0,00	0,26	0,00	0,26	0,00	0,26	0,00	0,26	0,00	0,26	0,00	0,26	0,04	23
317,318,328,329	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,01	4
319-327	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	9
330-417	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	88
429-455	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	27
456-489	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	34
490-524	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	35
													1,00	524
	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017		
Resultado	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02		

Figura 3.10: Organización final Coronografías

Estos valores se integraran a la organización final de inspecciones al final de esta sección.

Termografías

A continuación, en la figura 3.11, se muestra el resumen final de datos de las termografías[7].

Mantenimientos	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017	Peso	Cant. Est
001-018	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,22	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,03	18
019-030	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,02	12
031-279	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,48	249
280-293/418-428	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	25
294-316	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	23
317,318,328,329	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	4
319-327	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	9
330-417	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	88
429-455	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	27
456-489	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	34
490-524	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	35
													1,00	524
	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017		
Resultado	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,04	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00		

Figura 3.11: Organización final Termografías

Estos valores se integrarán a la organización final de inspecciones al final de esta sección.

Siliconado

Se ha tomado la decisión de reemplazar los aisladores de las estructuras más problemáticas por aisladores siliconados que presentan una resistencia mucho mayor a la contaminación como se indico en el

[6]Para conocer los pasos intermedios para la organización de los datos, tomar como ejemplo el método seguido para los datos de lavado en la sección 3.4.2: "Lavado de aisladores"

[7]Para conocer los pasos intermedios para la organización de los datos, tomar como ejemplo el método seguido para los datos de lavado en la sección 3.4.2: "Lavado de aisladores"

marco teórico de este trabajo. Se incluyen estos datos dentro de las inspecciones y sus datos se muestran organizados en la figura 3.12[8].

Las estructuras siliconadas al no necesitar el mismo mantenimiento que los aisladores de vidrio, como se explicó en la sección 2.5.12, se dejarán fuera del análisis final, pero su reemplazo será contado dentro de los mantenimientos realizados entre los 2012 - 2017.

Mantenimientos	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017	Peso	Cant. Est
001-018	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,89	0,00	0,03	18
019-030	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	12
031-279	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	249
280-293/418-428	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	25
294-316	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,04	23
317,318,328,329	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	1,50	0,01	4
319-327	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,67	0,67	0,02	9
330-417	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	88
429-455	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	27
456-489	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	34
490-524	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	35
													1,00	524
	1/2012	2/2012	1/2013	2/2013	1/2014	2/2014	1/2015	2/2015	1/2016	2/2016	1/2017	2/2017		
Resultado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,02		

Figura 3.12: Organización final reemplazo por aisladores siliconados

Estos valores se integrarán a la organización final de inspecciones al final de esta sección.

Fallas

Como se mencionó anteriormente, existen 10 fallas entre los años 2012 - 2017 según los informes de falla del CEN. Estos se tabulan en la tabla 3.5.

Informe de falla	Estructura	Fecha	Semestre
3150	Desconocido	29/08/2012	2/2012
3161	318	20/09/2012	2/2012
3162	318	20/09/2012	2/2012
3453	Desconocido	21/11/2013	2/2013
3545	Desconocido	12/04/2014	1/2014
3551	Desconocido	20/04/2014	1/2014
4247	421	16/09/2016	2/2016
4249	421	26/09/2016	2/2016
4429	Desconocido	19/03/2017	1/2017
4557	Desconocido	04/07/2017	1/2017

Tabla 3.5: Fallas entre 2012 - 2017

Al no conocerse las ubicaciones de todas las fallas, seguiremos las hipótesis planteadas en la sección 3.3.2.

[8]Para conocer los pasos intermedios para la organización de los datos, tomar como ejemplo el método seguido para los datos de lavado en la sección 3.4.2: “Lavado de aisladores”

Resumen final de inspecciones y fallas

Finalmente, con los resúmenes finales de cada tipo de inspección mostrados en las figuras 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 y la tabla 3.5, se completa el resumen general de inspecciones. La tabla 3.6 muestra esta organización la cual sera utilizada más adelante en el trabajo de creación de un nuevo plan de mantenimiento.

	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografías	Termografías	Siliconado	Inspecciones	Fallas
1/2012	1,22	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	1,23	0
2/2012	1,13	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	1,15	3
1/2013	0,77	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,78	0
2/2013	0,91	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,94	1
1/2014	1,35	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	1,36	2
2/2014	1,15	0,75	0,00	0,02	0,02	0,00	1,94	0
1/2015	1,35	0,99	0,00	0,01	0,04	0,00	2,39	0
2/2015	1,20	1,05	0,00	0,02	0,00	0,00	2,27	0
1/2016	1,50	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	1,53	0
2/2016	1,23	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	1,28	2
1/2017	1,77	1,00	0,02	0,01	0,00	0,24	3,04	2
2/2017	1,21	1,04	0,01	0,02	0,00	0,02	2,30	0

Tabla 3.6: Organización final de inspecciones y eventos de falla

El número total de inspecciones de la penúltima columna de la derecha se hace por una suma directa de las inspecciones en cada fila. Esto es posible porque cada línea de esta tabla ya considera el peso de la cantidad de estructuras por sección sobre la cantidad total en cada valor.

De esta forma, tenemos los datos de periodicidades ordenados y parametrizados tomando en cuenta el tamaño real de la línea de transmisión y los respectivos pesos en el cálculo de periodicidades para cada sección. Con estos datos, se puede continuar en la búsqueda de la tasa media de fallas.

3.4.3. Tasa media de fallas

Para la tasa media de fallas se toma la parte derecha de la tabla 3.6 en donde se resumen las inspecciones realizadas sobre la línea y las fallas ocurridas. Como se menciono anteriormente, se deben transformar estos datos a cantidades por mes. Tomamos la base de que por cada semestre existen 6 meses y tabulamos los datos en la tabla 3.7 para continuar con el trabajo de encontrar la tasa media de fallas.

Inspecciones insp/mes	Fallas número/mes
0,2050	0,000
0,1917	0,500
0,1300	0,000
0,1567	0,167
0,2267	0,333
0,3233	0,000
0,3983	0,000
0,3783	0,000
0,2550	0,000
0,2133	0,333
0,5067	0,333
0,3833	0,000

Tabla 3.7: Inspecciones mensuales vs Fallas por mes

Al graficar esta tabla (figura 3.13) se observa que los datos son bastante volátiles en términos de dispersión y se deben tomar algunas suposiciones. Para comenzar, estos datos no presentan los requisitos para realizar una regresión de decaimiento exponencial en su totalidad. Al aplicar una regresión exponencial resulta una ecuación que no representa una tasa de fallas normal frente a la frecuencia de inspección. Se necesita encontrar un modelo en el que decaiga el indice de fallas al momento de aumentar la frecuencia de inspecciones y que represente de la mejor manera posible esta relación.

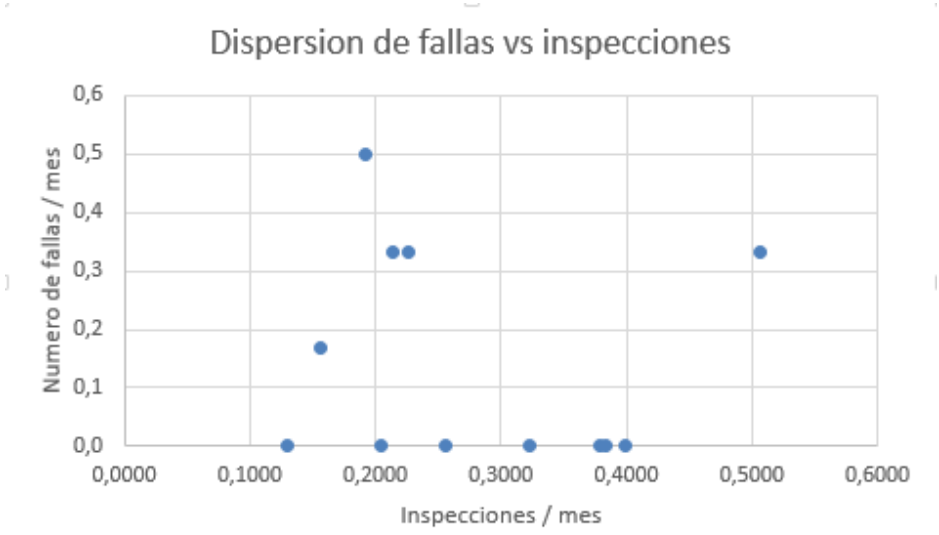


Figura 3.13: Gráfico de dispersión: Fallas/mes vs Inspecciones/mes

La volatilidad de los datos muestran de manera indirecta la probabilidad de que ocurre una falla. Como se comento en el marco teórico, los flashovers en los aisladores de una línea de alta tensión presentan este comportamiento el cual se ve agravado o suavizado por las condiciones climáticas diarias.

Se probaron diferentes tipos de regresiones (exponencial, hiperbólica, polinomial, etc) e incluso se

evaluó la opción de tomar solo los datos distintos de cero para considerar una cota superior de fallas pero ninguna función se ajustó adecuadamente. Luego de esto se ha decidido finalmente de trabajar con una regresión hiperbólica que tome en cuenta todos los datos del gráfico de dispersión. Basado en los distintos ajustes probados, la regresión hiperbólica nos entrega una representación que se ajusta mejor a las necesidades del problema, entregado una curva suave que presenta un valor mayor a cero en el infinito que representa el factor probabílistico de la ocurrencia de fallas incluso con una alta tasa de inspecciones por mes. Esta regresión en conjunto con los datos se muestra en la figura 3.14.

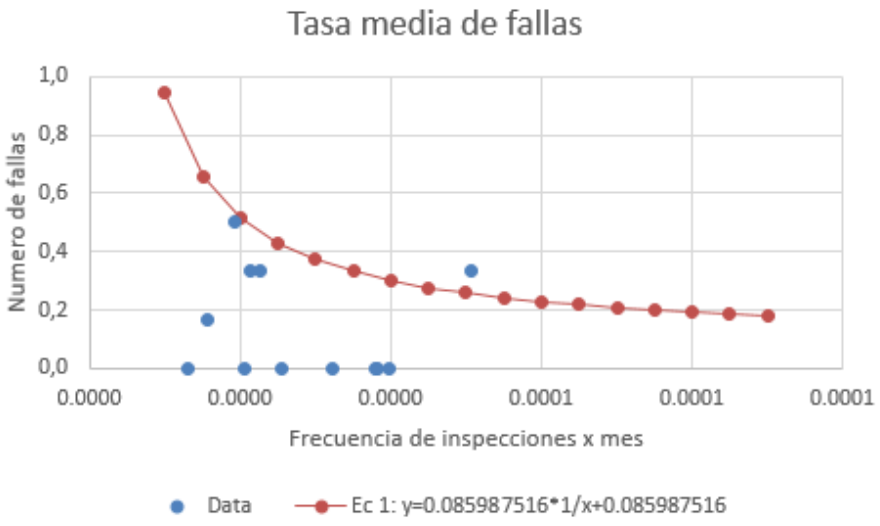


Figura 3.14: Gráfico de dispersión: Fallas/mes vs Inspecciones/mes y regresión hiperbólica

La regresión hiperbólica que representa los datos dispersos se muestra en la ecuación (3.7)

$$\lambda(f) = 0{,}085987516 \cdot \frac{1}{f} + 0{,}085987516 \tag{3.7}$$

Al llevar a esta ecuación a su equivalente lineal (figura 3.15) se obtiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0{,}0139$ bastante bajo, lo que demuestra la volatilidad de la dispersión de los datos.

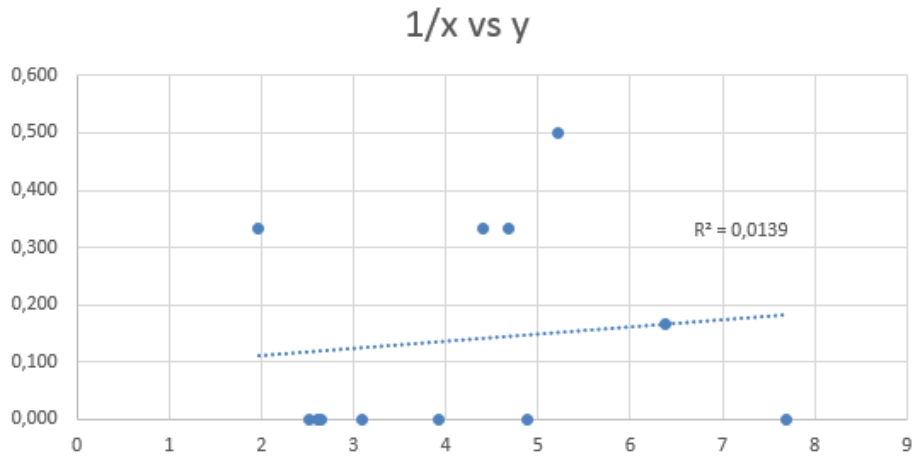


Figura 3.15: Coeficiente de determinación R^2

De todas formas, la ecuación de regresión nos entrega información interesante. Para comenzar, esta es una ecuación que decae exponencialmente hasta un valor de 0,085987516. Esto representa indirectamente la probabilidad de que una falla ocurra, incluso llevando a cabo el máximo de inspecciones posibles. Esta constante es bastante baja y puede representar una buena aproximación de la tasa de falla probable en el infinito. Esta probabilidad puede deberse, por ejemplo, a una alta tasa de inspeccion, a un día con mucho viento y contaminación y a una mañana con mucho rocío en la cual se detonen fenómenos de flashover.

3.4.4. Tiempos de inspección y de falla

Otra parte importante del modelo es conocer los tiempos medios de falla y de inspección para incluirlos dentro de la fórmula de optimización. Se utiliza la herramienta "diagrama de Jack Knife" para ordenar las diferentes secciones de la línea respecto a la priorización de las medidas de instalación de aisladores siliconados.

MTTR: Tiempo medio de falla

Obtener el tiempo medio de falla "MTTR" es relativamente sencillo. En la tabla 3.8 se tabulan los tiempos de inicio, fin y tiempo total de falla. Para obtener el MTTR basta solamente realizar un promedio de todos estos tiempos de falla. Las fallas son consideradas en su totalidad incluso sin tener certeza de que sean en su totalidad a causa de un flashover. Esto es debido a que consideramos también todos los tipos de mantenimiento realizado sobre la línea y, por ejemplo, si existieran problemas estructurales o de otra característica, podrían ser también observados con una inspección visual terrestre, la cual será integrada dentro de los mantenimientos en el nuevo plan.

Informe de falla	Estructura	Inicio	Fin	Tiempo de falla	Fecha	Semestre
3150	Desconocido	01:31 hrs	02:45 hrs	1,23 horas	29/08/2012	2/2012
3161	318	05:58 hrs	07:12 hrs	1,23 horas	20/09/2012	2/2012
3162	318	08:13 hrs	18:51 hrs	10,63 horas	20/09/2012	2/2012
3453	Desconocido	05:08 hrs	05:22 hrs	0,23 horas	21/11/2013	2/2013
3545	Desconocido	01:20 hrs	01:21 hrs	0,02 horas	12/04/2014	1/2014
3551	Desconocido	06:50 hrs	07:16 hrs	0,43 horas	20/04/2014	1/2014
4247	421	04:39 hrs	05:43 hrs	1,07 horas	16/09/2016	2/2016
4249	421	07:20 hrs	07:32 hrs	0,17 horas	26/09/2016	2/2016
4429	Desconocido	06:38 hrs	08:00 hrs	1,37 horas	19/03/2017	1/2017
4557	Desconocido	16:49 hrs	17:00 hrs	0,18 horas	04/07/2017	1/2017

Tabla 3.8: MTTR: Fallas entre 2012 - 2017

El MTTR para las fallas de la línea 1x220 Cóndores - Parinacota es:

$$MTTR = 1{,}656667\,horas = 0{,}00230093\,meses \tag{3.8}$$

MTTI: Tiempo medio para inspeccionar

El tiempo medio de inspeccion "MTTI" corresponde a la media de la suma total de los tiempos de inspección. Es en este apartado en donde el diagrama de JackKnife, descrito en la sección 2.2.1, cobra valor y puede ser utilizado en conclusiones que tienen incluso más alcance que el mismo calculo del MTTI. Las hipótesis que se toman para le cálculo de este valor son explicadas en la sección 3.3.2.

Se comienza ordenando los datos necesarios para el trabajo en el periodo 2012 - 2017. En este caso se utilizan los datos de los lavados de aisladores, específicamente los tramos de inspeccion, la cantidad de estructuras por tramo, la cantidad total de inspecciones realizadas y las horas totales invertidas para este mantenimiento. Estos datos se resumen en la tabla 3.9 y han sido recopilados desde los informes de mantenimiento entregados por Transelec.

Tramo	Cant. Estruct. 2012 - 2017	N inspecciones 2012 - 2017	Tiempo total horas
001-018	18	634,00	226,39
019-030	12	454,00	175,75
031-279	249	2773,00	899,67
280-293/418-428	25	366,00	241,28
294-316	23	506,00	237,23
317,318,328,329	4	63,00	134,45
319-327	9	192,00	272,11
330-417	88	980,00	318,42
429-455	27	405,00	187,79
456-489	34	646,00	280,99
490-524	35	734,00	335,84

Tabla 3.9: Datos ordenados para el cálculo del MTTI

Teniendo estos datos, hace falta traducirlos. Las inspecciones deben estar expresadas en inspecciones por estructura realizadas por hora. Para esta parte del trabajo se utilizará extraordinariamente una base temporal de "horas" y no de "meses" como se venía utilizando hasta ahora. Como se toman los datos entre 2012 - 2017, las horas totales son igual a $Horas_tot = 6 * 365 * 24$ en referencia a los 6 años de datos, los 365 días de cada año y las 24 horas de cada día. La expresión para las inspecciones viene dada entonces por "(Número de inspecciones/Cantidad de estructuras)/(365*6*24)". El MTTI debe tener un tratamiento similar. Para este indicador sólo se deben dividir el tiempo total de inspeccion en el número de inspecciones. De esta manera, obtenemos el tiempo medio de las inspecciones por tramo. Para terminar, el MTTI es el promedio de los tiempos medios de inspección de las secciones.

La tabulación de los nuevos valores obtenidos a partir de la tabla 3.9 se muestra en la tabla 3.10.

Tramo	inspecciones/estructura (1/estructuras)/horas	MTTI horas	Indisponibilidad %
001-018	0,00067013360	0,357	0,0239 %
019-030	0,00071981228	0,387	0,0279 %
031-279	0,00021188254	0,324	0,0069 %
280-293/418-428	0,00027853881	0,659	0,0184 %
294-316	0,00041856925	0,469	0,0196 %
317,318,328,329	0,00029965753	2,134	0,0640 %
319-327	0,00040588534	1,417	0,0575 %
330-417	0,00021187906	0,325	0,0069 %
429-455	0,00028538813	0,464	0,0132 %
456-489	0,00036149163	0,435	0,0157 %
490-524	0,00039899978	0,458	0,0183 %
	Promedio	0,675380493	0,0262 %

Tabla 3.10: Datos ordenados por tramo para el diagrama de Jack Knife

En esta tabla se muestra el MTTI buscado en horas y una columna que es la multiplicación de las dos centrales que dan como resultado un número adimensional. Esta columna expresa el porcentaje del tiempo total en el que el activo se encuentra en estado de mantenimiento.

Finalmente el MTTI debe ser pasado a meses quedando de la siguiente forma:

$$MTTI = 0{,}675380493\, horas = 0{,}000938028\, meses \tag{3.9}$$

Diagrama de Jack Knife

Con la información de la tabla 3.10 realizamos un gráfico de dispersión logarítmica en los dos ejes, expresando en el eje "y" los MTTI en horas de cada sección de la línea y en el eje "x" la frecuencia de inspecciones por estructura y por hora. El resultado se muestra en la figura 3.16.

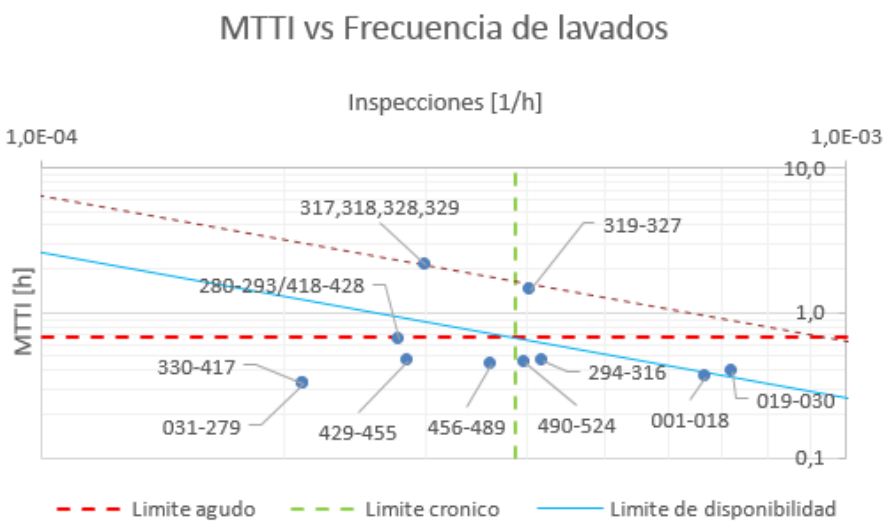


Figura 3.16: Diagrama de Jack Knife por secciones de la línea 1x220 Cóndores - Parinacota

Este diagrama sirve para realizar una priorización en términos de mantenimiento de los activos y grafica las indisponibilidades de estos. La línea azul, llamada "Limite de disponibilidad", es una línea de equidisponibilidad y sirve para marcar un límite entre estas prioridades. Existen infinitas líneas de equidisponibilidad, pero esta marca la media que representa a los diferentes activos. La línea diagonal punteada representa la peor disponibilidad presentada por un activo, en este caso la sección "317,318,328,329". Mientras más nos alejemos en paralelo a esta línea en dirección negativa, encontraremos distintas secciones de la línea con diferentes disponibilidades. En base a todo esto y a lo explicado en el marco teórico sobre este tipo de esquemas, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- La sección "317,318,328,329" Es la sección que presenta una peor disponibilidad según los datos recabados por Transelec y podría ser considerada como la sección más problemática en términos de indisponibilidad con respecto a sus pares.
- Se ha tomado la decisión de instalar aisladores siliconados en las secciones "317,318,328,329", "319-327", "019-030", "001-018" en conjunto con la estructura 316. Esto concuerda exactamente con las secciones más priorizables con respecto a la indisponibilidad según el diagrama de Jack Knife.

3.4.5. Costos

Incluso al no incluir los costos en el modelo, razones que se explicaron en la sección 3.3.2, es importante también el realizar una comparativa del costo anual del mantenimiento realizado actualmente con el costo anual del nuevo plan propuesto.

Los precios de los procedimientos mostrados a continuación fueron los entregados por Transelec y que son costos licitados con una empresa sub-contratante y fueron fijados "por unidad". Los costos de los aisladores nuevos fueron muy difíciles de encontrar. Se realizaron cotizaciones vía correo electrónico con distintas empresas y solo se pudo obtener la cotización de de la empresa RTHÖ, la cual se muestra en los anexos en la figura 5.7.

Los costos a tomar en cuenta son los siguientes:

- Lavados: El precio se presenta unitariamente como el lavado por una cadena de aisladores y tiene un costo de 31,88 USD por cadena.
- Inspección Visual Pedestre: El costo de realizar esta inspeccion en la totalidad de la línea es de 10315,88 USD
- Reemplazo de aisladores: Consta de un costo por la instalación y otro por la adquisición del nuevo aislador de vidrio. Los precios son: Instalación 124,11 USD por cadena de aisladores; Costo de un aislador de vidrio nuevo: 36 USD (Presupuesto realizado por la empresa RTHÖ - Chile).
- Coronografías: Costo de 255,08 USD por estructura.
- Termografías: Costo de 146,85 USD por estructura.
- Instalación de aisladores siliconados: Consta de dos costos a considerar, el costo de instalación de 124,11 USD por cadena de aisladores. El costo de compra de este tipo de aislador jamás fue informado sin importar la cantidad de cotizaciones ni los meses de espera por las respuestas.

Los costos de mantenimiento anual promedio del plan actual serán calculados sin tomar en cuenta los costos de intercambio por aisladores siliconados dada la falta de respuesta de las cotizaciones realizadas.

Tomando en cuenta la cantidad de cadenas y estructuras por sección, se pueden calcular los precios de realizar un mantenimiento de cada tipo a la totalidad de la sección. Luego, solo se debe multiplicar este costo por la cantidad de veces promedio que se realizaron los distintos tipos de mantenimientos en un año.

Los costos para realizar un mantenimiento completo en cada sección se muestra en la figura 3.17

Costos	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado	Costo total
001 - 018	1848,85	354,36	9286,43	4591,51	2643,25	No conocido	18724,41
019 - 030	1243,20	236,24	6244,32	3061,01	1762,17	No conocido	12546,93
031 - 279	26967,77	4902,01	135453,73	63515,92	36564,97	No conocido	267404,40
280 - 293/418 - 428	2996,42	492,17	15050,41	6377,10	3671,18	No conocido	28587,29
294 - 316	2263,25	452,80	11367,87	5866,93	3377,49	No conocido	23328,33
317,318,328,329	382,52	78,75	1921,33	1020,34	587,39	No conocido	3990,32
319 - 327	223,14	177,18	1120,78	2295,76	1321,63	No conocido	5138,48
330 - 417	9116,76	1732,44	45791,69	22447,39	12922,56	No conocido	92010,84
429 - 455	2773,28	531,54	13929,64	6887,27	3964,88	No conocido	28086,61
456 - 489	3697,71	669,35	18572,85	8672,86	4992,81	No conocido	36605,57
490 - 524	5100,29	689,04	25617,73	8927,94	5139,65	No conocido	45474,65
Costo total linea	56613,19	10315,88	284356,77	133664,02	76947,98	No conocido	561897,83

Figura 3.17: Costos por realizar un mantenimiento completo en la línea, en USD

Se tabulan las inspecciones realizadas en promedio por año y se obtiene un promedio general (Figura 3.18).

Frecuencias	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
2012	2,35	0	0	0,03	0	0
2013	1,68	0	0	0,03	0,01	0
2014	2,5	0,75	0	0,03	0,02	0
2015	2,55	2,04	0	0,03	0,04	0
2016	2,73	0	0,03	0,03	0,02	0
2017	2,98	2,04	0,03	0,03	0	0,26
Prom. Inspecciones	2,4650	0,8050	0,0100	0,0300	0,0150	0,0433

Figura 3.18: Inspecciones anuales según tipo de mantenimiento

Finalmente los costos promedio del mantenimiento llevado a cabo hasta ahora se obtiene al multiplicar los costos totales de cada mantenimiento y la cantidad de veces promedio que se realiza cada tipo de mantenimiento por año. Los costos totales se muestran en la figura 3.19 y es de 155863,51 USD sin considerar el intercambio de aisladores siliconados.

Mantenimientos	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado	Total USD
Costo medio/anual USD	139551,52	8304,28	2843,57	4009,92	1154,22	No conocido	155863,51
Porcentaje	89,53%	5,33%	1,82%	2,57%	0,74%	No conocido	100,00%

Figura 3.19: Costos totales del actual plan de mantenimiento en USD

Se tomará la misma base de precios para conocer el nuevo plan de mantenimiento propuesto.

3.5. Nuevo plan de mantenimiento propuesto

Resumiendo el trabajo realizado, para realizar el modelo de optimización propuesto se necesitan los siguientes datos:

- Inspecciones correctivas:
  - Tasa de falla $\lambda(f)$: Se obtuvo esta función mediante una regresión hiperbólica. Ecuación (3.7)

$$\lambda(f) = 0{,}085987516 \cdot \frac{1}{f} + 0{,}085987516$$

  - Tiempo medio de falla "MTTR": Se calculó este valor con las fallas ocurridas en la línea y su tiempo individual.

$$MTTR = 0{,}00230093\, meses$$

- Inspecciones regulares:
  - Frecuencia media de inspección: Se calculó tomando todos los datos de inspecciones realizadas entre 2012 - 2017.

$$f = 0{,}281\, [1/mes]$$

  - Tiempo medio de inspeccion "MTTI": Se obtuvo con los tiempos de lavado de aisladores. Las hipótesis se exponen en la sección 3.3.2.

$$MTTI = 0{,}000938028\, meses$$

- Costos: No se obtuvieron los costos específicos de falla, por lo que se realizará una maximización de la disponibilidad del activo sin contar con los costos. Los costos de instalación e inspeccion se exponen más en detalle en la sección 3.4.5. Se utilizarán los costos de inspección para comparar el precio de los planes de mantenimiento.

3.5.1. Maximizar disponibilidad

Según la ecuación (3.6), le frecuencia óptima para una tasa de falla hiperbólica es:

$$f^* = \sqrt{k \cdot \frac{MTTR}{MTTI}} \tag{3.10}$$

Con "k" como el factor que multiplica a $\frac{1}{f}$ en la regresión (3.7).
Al reemplazar estos valores, se obtiene:

$$f^* = \sqrt{0{,}085987516 \cdot \frac{0{,}00230093}{0{,}000938028}} = 0{,}459262935[1/mes] \tag{3.11}$$

Para comparar este valor, se gráfica la disponibilidad punto por punto según los datos de la tabla 3.11.

f	$\lambda(f)$	Ind_{MTTI}	Ind_{MTTR}	Disponibilidad
0,29	0,382496191	0,0272 %	0,0880 %	99,884811 %
0,31	0,363366599	0,0291 %	0,0836 %	99,887337 %
0,33	0,346555746	0,0310 %	0,0797 %	99,889330 %
0,35	0,331666133	0,0328 %	0,0763 %	99,890880 %
0,37	0,318386207	0,0347 %	0,0733 %	99,892060 %
0,39	0,306468326	0,0366 %	0,0705 %	99,892926 %
0,41	0,295713164	0,0385 %	0,0680 %	99,893525 %
0,43	0,285958483	0,0403 %	0,0658 %	99,893894 %
0,45	**0,277070885**	**0,0422 %**	**0,0638 %**	**99,894064 %**
0,47	0,268939677	0,0441 %	0,0619 %	99,894059 %
0,49	0,261472242	0,0460 %	0,0602 %	99,893901 %
0,51	0,254590488	0,0478 %	0,0586 %	99,893609 %
0,53	0,248228112	0,0497 %	0,0571 %	99,893197 %
0,55	0,242328454	0,0516 %	0,0558 %	99,892679 %
0,57	0,236842807	0,0535 %	0,0545 %	99,892066 %
0,59	0,231729068	0,0553 %	0,0533 %	99,891367 %
0,61	0,226950657	0,0572 %	0,0522 %	99,890590 %

Tabla 3.11: Cálculo punto por punto de la disponibilidad del activo

La frecuencia varía desde 0,29$[1/mes]$ hasta 0,61$[1/mes]$ y la tasa de fallas $\lambda(f)$ varía en función de la frecuencia. Las indisponibilidades Ind_{MTTI} y Ind_{MTTR} se calculan como

$$Ind_{MTTI} = f \cdot MTTI$$

$$Ind_{MTTR} = \lambda(f) \cdot MTTR$$

y la disponibilidad se calcula finalmente como

$$Disponibilidad = (1 - Ind_{MTTI}) \cdot (1 - Ind_{MTTR})$$

Los datos se grafican finalmente y se muestran en la figura 3.20.

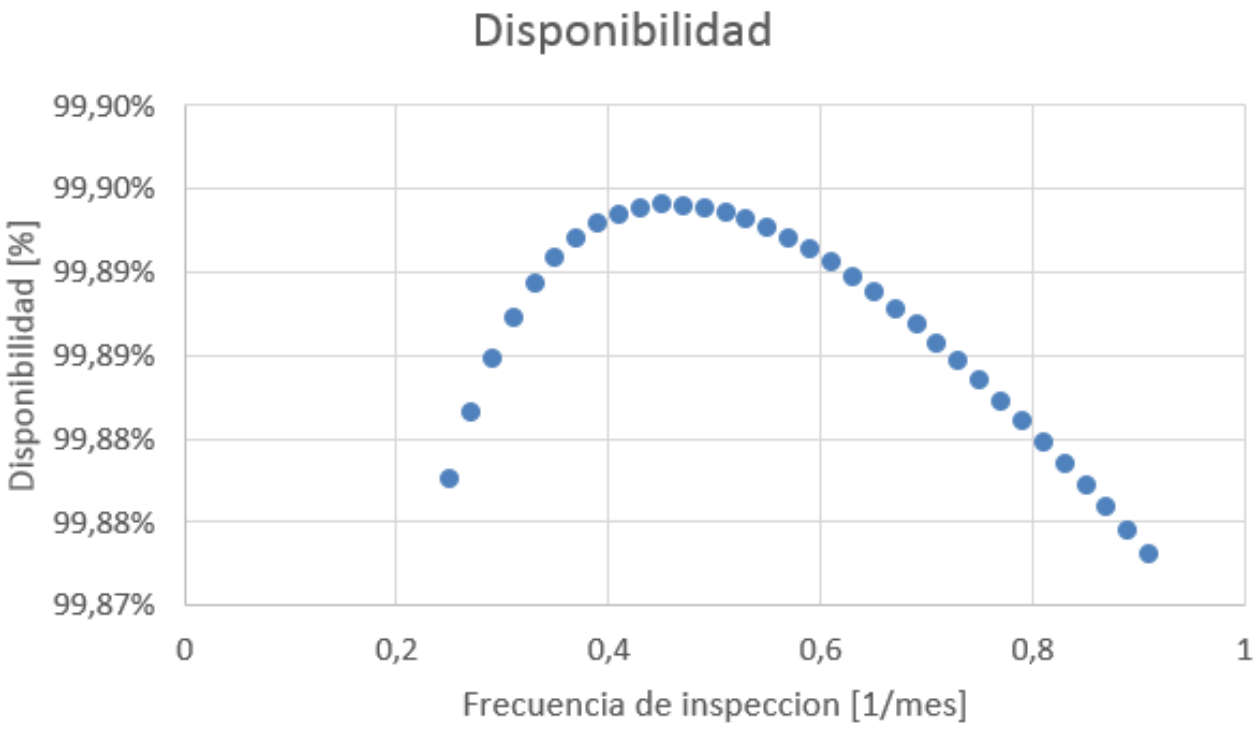


Figura 3.20: Disponibilidad del activo en función de la frecuencia de inspección

Tanto los resultados de disponibilidad punto a punto y el cálculo mediante la fórmula coinciden. Se concluye entonces que la frecuencia óptima promedio de inspecciones es de **f = 0,459262935 [1/mes]**.

3.5.2. Cálculo de frecuencias de inspección para los distintos mantenimientos

Para el cálculo de las frecuencias especificas para cada tipo de mantenimiento es necesario traducir la frecuencia óptima promedio obtenida anteriormente. Para hacer esto, se utiliza un resumen por sección de las frecuencias medias mensuales de los mantenimientos. Esto es básicamente la suma de los mantenimientos promedio por estructura en cada sección y dividido por la cantidad de meses totales de estudio (12 meses x 6 años). Esto es para tener las proporciones mensuales, sin corregir por el peso de la sección (Estructuras de la sección/Estructuras totales), para la traducción de la frecuencia promedio mensual encontrada a cada tipo de mantenimiento en cada sección.

El cuadro resumen de las frecuencias mensuales de mantenimiento por sección se muestra en la figura 3.21.

Ins/mes por seccion : mantenimiento actual promedio basado en los datos de mantenimiento						
Mantenimientos	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
001-018	0,49	0,07	0,00	0,00	0,01	0,05
019-030	0,53	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
031-279	0,15	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
280-293/418-428	0,20	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
294-316	0,31	0,07	0,00	0,02	0,00	0,00
317,318,328,329	0,22	0,05	0,10	0,13	0,00	0,04
319-327	0,29	0,08	0,00	0,00	0,01	0,07
330-417	0,15	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
429-455	0,21	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
456-489	0,26	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
490-524	0,29	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
Promedio	0,28	0,07	0,01	0,01	0,00	0,02

Figura 3.21: Inspecciones/mes promedio por sección, años 2012 - 2017

Los porcentajes de cada tipo de mantenimiento se obtienen directamente del resumen de mantenimientos por semestre entre 2012 - 2017. Los datos y los porcentajes por tipo de mantenimiento basado en los datos, se presenta en la figura 3.22.

	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
1/2012	1,22	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
2/2012	1,13	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
1/2013	0,77	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
2/2013	0,91	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00
1/2014	1,35	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
2/2014	1,15	0,75	0,00	0,02	0,02	0,00
1/2015	1,35	0,99	0,00	0,01	0,04	0,00
2/2015	1,20	1,05	0,00	0,02	0,00	0,00
1/2016	1,50	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00
2/2016	1,23	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00
1/2017	1,77	1,00	0,02	0,01	0,00	0,24
2/2017	1,21	1,04	0,01	0,02	0,00	0,02
Porcentajes	73,18%	23,90%	0,30%	0,89%	0,45%	1,29%

Figura 3.22: Resumen de inspecciones semestrales, años 2012 - 2017

De la figura 3.22, se extraen las siguientes proporciones en los tipos de inspección.

- Lavados: 73,18 % del total de inspecciones.
- IVP: 23,90 % del total de inspecciones.
- Reemplazo de aisladores: 0,30 % del total de inspecciones.

- Coronografías: 0,89 % del total de inspecciones.
- Termografías: 0,45 % del total de inspecciones.
- Instalación de aisladores siliconados: 1,29 % del total de inspecciones.

Utilizando estos porcentajes, distribuimos la frecuencia óptima encontrada para cada tipo de mantenimiento como se muestra en la figura 3.23.

Ins/mes : Respetando los mismos porcentajes de frecuencias de los datos						
Total	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
100%	73,18%	23,90%	0,30%	0,89%	0,45%	1,29%
0,45926	0,33610	0,10976	0,00136	0,00409	0,00205	0,00591

Figura 3.23: Inspecciones/mes optima considerando proporciones de mantenimientos, años 2012 - 2017

Con la frecuencia óptima mensual por tipo de inspección encontrada (Figura 3.23) y la frecuencia mensual por sección y por tipo de inspección obtenida de los datos de mantenimiento (Figura 3.21 se obtiene, por proporción directa simple, la frecuencia mensual optima de mantenimiento por sección y por tipo de mantenimiento. Los resultados se muestran en la figura 3.24.

	Ins/mes por seccion : frecuencia optima					
Mantenimientos	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
001-018	0,5821	0,1144	0,0000	0,0000	0,0070	0,0202
019-030	0,6253	0,1373	0,0000	0,0000	0,0022	0,0000
031-279	0,1840	0,1110	0,0000	0,0000	0,0010	0,0000
280-293/418-428	0,2420	0,1035	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
294-316	0,3638	0,1186	0,0000	0,0067	0,0000	0,0014
317,318,328,329	0,2631	0,0801	0,0150	0,0383	0,0000	0,0156
319-327	0,3438	0,1270	0,0000	0,0000	0,0061	0,0278
330-417	0,1843	0,1147	0,0000	0,0000	0,0008	0,0000
429-455	0,2479	0,0916	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
456-489	0,3140	0,1110	0,0000	0,0000	0,0017	0,0000
490-524	0,3468	0,0982	0,0000	0,0000	0,0036	0,0000
Promedio	0,3361	0,1098	0,0014	0,0041	0,0020	0,0059
Porcentaje	73,18%	23,90%	0,30%	0,89%	0,45%	1,29%

Figura 3.24: Inspecciones/mes óptima por sección considerando proporciones de mantenimientos, años 2012 - 2017

Se observa que las proporciones se mantienen entre los porcentajes obtenidos desde el modelo y los porcentajes de mantenimiento obtenidos directamente desde los datos.

Luego, para obtener las periodicidades en meses solo basta obtener el recíproco de estos valores (pasar de frecuencias a periodos). Los resultados se muestran en la figura 3.25.

Periodicidad optima en meses por seccion: Basada en datos 2012 - 2017						
Mantenimientos	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
001-018	1,72	8,74	0,00	0,00	143,13	49,40
019-030	1,60	7,28	0,00	0,00	447,28	0,00
031-279	5,44	9,01	0,00	0,00	1022,35	0,00
280-293/418-428	4,13	9,67	0,00	0,00	0,00	0,00
294-316	2,75	8,43	0,00	150,02	0,00	739,14
317,318,328,329	3,80	12,48	66,67	26,09	0,00	64,06
319-327	2,91	7,87	0,00	0,00	162,65	35,99
330-417	5,43	8,72	0,00	0,00	1192,74	0,00
429-455	4,03	10,92	0,00	0,00	0,00	0,00
456-489	3,18	9,01	0,00	0,00	596,37	0,00
490-524	2,88	10,18	0,00	0,00	275,25	0,00

Figura 3.25: Periodicidades óptimas en meses por sección considerando proporciones de mantenimientos, años 2012 - 2017

Modificación del plan propuesto

Las periodicidades mostradas en la figura 3.25 serían verdaderas si no se hubiesen instalado los aisladores siliconados en partes de la línea. Cabe recordar que esto se realiza en las partes más problemáticas de la línea 1x220 Cóndores - Parinacota y que luego de la instalación, las estructuras afectadas gozarán de una resistencia mucho mayor contra la contaminación. Por esta razón, estas estructuras no deben incluirse dentro del plan nuevo de mantenimiento, lo que cambia el seccionamiento de la línea. En la tabla 3.2 se indican las estructuras siliconadas, lo que da como resultado un nuevo seccionamiento que se muestra en la tabla 3.12.

Sección	Estructuras
1	031 - 279
2	280 - 293 / 418 - 428
3	294 - 315
4	330 - 417
5	429 - 455
6	456 - 489
7	490 - 524

Tabla 3.12: Nuevo seccionamiento de la línea 1x220 Cóndores - Parinacota

Se observa que cuatro secciones fueron cambiadas completamente por aisladores siliconados y que la sección 294 - 316 ahora es 294 - 315. Esto último agregará un pequeño factor para los costos de esta sección.

Esta nueva caracterización tiene otros efectos sobre los mantenimientos. Estos efectos y las nuevas hipótesis se explican a continuación:

- El nuevo plan de mantenimiento debe plantearse para las nuevas secciones de la línea (Tabla 3.12).
- En el plan antiguo, las termografías y las coronografías se realizaban en las secciones que ahora han sido reemplazadas, por lo tanto, no se considerará este tipo de mantenimientos en el nuevo plan.

- El reemplazo por aisladores siliconados se terminará en el año 2018 según los informes de Transelec, por lo que no se integrará dentro del nuevo plan.
- Los reemplazos de aisladores por aisladores de vidrio nuevos se realizarán cada 10 años (120 meses). Según la bibliografía, la vida útil máxima esperable para aisladores de vidrio esta entre 30 y 35 años [15] [16] por lo que, dadas las altas condiciones de contaminación presentes en la línea Cóndores - Parinacota, se tomará sólo un tercio de esta vida útil. Transelec puede cambiar este valor por los años de vida útil observados en esta línea durante sus años de explotación. Esto se incluirá dentro del plan.

Los porcentajes de la figura 3.23 deben ser entonces modificados con respecto a los puntos recién expuestos. Las inspecciones de termografias y coronografias se anulan por lo que cambian a un 0 %. Los reemplazos de aisladores cada 120 meses, resultan en una frecuencia de 0,0083 inspecciones por mes, lo que representa un 1,81 % de la frecuencia óptima total. Para los lavados y las IVP, se mantiene su proporción de 73,18 %/23,90 % de la figura 3.23 para el 98,18 % restante, con un porcentaje de 74,01 % y 24,17 % respectivamente. Las nuevas frecuencias óptimas para estas condiciones son las expuestas en la figura 3.26.

	Ins/mes: Plan actualizado y basado en el mantenimiento actual						
	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado	Total
Ins/mes	0,3399	0,1110	0,0083	0,0000	0,0000	0,0000	0,4593
Porcentaje	74,01%	24,17%	1,81%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%

Figura 3.26: Inspecciones mensuales promedio, nuevo plan actualizado con las nuevas condiciones

Con los porcentajes de cada tipo de mantenimiento encontrados, se sigue el mismo proceso realizado para las frecuencias mensuales y periodicidades de las figuras 3.24 y 3.25.

Como los datos están referidos a toda la línea, se realiza el plan para toda la línea y luego se eliminan las secciones que han sido suprimidas. La sección 294 - 316 que se ha transformado en 294 - 315 responderá a las mismas frecuencias de inspección, la estructura de menos que ahora se tiene se corregirá por un factor 22/23 al momento de calcular los costos anuales del nuevo plan de mantenimiento.

El cuadro que resume las nuevas frecuencias bajo las nuevas condiciones se muestra en la figura 3.27.

	Ins/mes por seccion : Mantenimiento propuesto, basado en mantenimiento actual					
Mantenimientos	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
001-018	0,5888	0,1157	0,0083	0	0	0
019-030	0,6324	0,1389	0,0083	0	0	0
031-279	0,1861	0,1123	0,0083	0	0	0
280-293/418-428	0,2447	0,1046	0,0083	0	0	0
294-316	0,3679	0,1199	0,0083	0	0	0
317,318,328,329	0,2661	0,0810	0,0083	0	0	0
319-327	0,3477	0,1285	0,0083	0	0	0
330-417	0,1864	0,1160	0,0083	0	0	0
429-455	0,2507	0,0926	0,0083	0	0	0
456-489	0,3176	0,1123	0,0083	0	0	0
490-524	0,3507	0,0993	0,0083	0	0	0
Promedio	0,3399	0,1110	0,0083	0	0	0
Porcentaje	74,01%	24,17%	1,81%	0	0	0

Figura 3.27: Inspecciones/mes óptima por sección considerando proporciones de mantenimientos y nuevas condiciones

Los porcentajes obtenidos anteriormente se respetan, lo que confirma el cálculo.

Finalmente, se agrega la última hipótesis del nuevo seccionamiento de la línea y se extraen de la planificación de la figura 3.27 las frecuencias correspondientes a las secciones que no han sido intercambiadas por aisladores siliconados.

El plan de frecuencias óptimas bajo el nuevo plan de mantenimiento se resume en la figura 3.28. Las periodicidades en meses se muestran en la figura 3.29.

Mantenimiento	Ins/mes por seccion : frecuencia optima					
	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
031-279	0,1861	0,1123	0,0083	0,0000	0,0000	0,0000
280-293/418-428	0,2447	0,1046	0,0083	0,0000	0,0000	0,0000
294-315	0,3679	0,1199	0,0083	0,0000	0,0000	0,0000
330-417	0,1864	0,1160	0,0083	0,0000	0,0000	0,0000
429-455	0,2507	0,0926	0,0083	0,0000	0,0000	0,0000
456-489	0,3176	0,1123	0,0083	0,0000	0,0000	0,0000
490-524	0,3507	0,0993	0,0083	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 3.28: Inspecciones/mes óptima por sección considerando proporciones de mantenimientos, nuevas condiciones y nuevas secciones

Mantenimientos	Periodicidad en meses por seccion : periodicidad optima					
	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
031-279	5,37	8,91	120,00	Nunca	Nunca	Nunca
280-293/418-428	4,09	9,56	120,00	Nunca	Nunca	Nunca
294-315	2,72	8,34	120,00	Nunca	Nunca	Nunca
330-417	5,37	8,62	120,00	Nunca	Nunca	Nunca
429-455	3,99	10,80	120,00	Nunca	Nunca	Nunca
456-489	3,15	8,91	120,00	Nunca	Nunca	Nunca
490-524	2,85	10,07	120,00	Nunca	Nunca	Nunca

Figura 3.29: Periodicidades óptimas en meses por sección considerando proporciones de mantenimientos, nuevas condiciones y nuevas secciones

3.5.3. Costos anuales del nuevo plan de inspección

Para calcular los costos, tal como se realizó en la sección 3.4.5, Se calcula la frecuencia anual de lavados. Como en este caso no son datos lo que se tienen sino que solamente frecuencias y periodicidades en meses, se transforman las frecuencias a frecuencias anuales y se calculan los costos de mantenimiento unitario para cada sección y cada mantenimiento.

La frecuencia anual de inspecciones por sección se muestra en la figura 3.30.

Mantenimiento	Ins/año por seccion : frecuencia optima					
	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
031-279	2,2326	1,3473	0,1000	0,0000	0,0000	0,0000
280-293/418-428	2,9367	1,2556	0,1000	0,0000	0,0000	0,0000
294-315	4,4151	1,4389	0,1000	0,0000	0,0000	0,0000
330-417	2,2367	1,3917	0,1000	0,0000	0,0000	0,0000
429-455	3,0090	1,1111	0,1000	0,0000	0,0000	0,0000
456-489	3,8113	1,3473	0,1000	0,0000	0,0000	0,0000
490-524	4,2085	1,1917	0,1000	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 3.30: Frecuencias anuales de mantenimiento del nuevo plan propuesto

De la misma forma, el cuadro resumen de costos unitarios que fue calculado de la misma manera que en la figura 3.17, se muestra en la figura 3.31. El factor 22/23 fue ingresado a la sección 294 - 315 por su disminución en una estructura causada por la instalación de los aisladores siliconados.

Mantenimiento	Costos totales unitarios de mantenimiento por seccion en USD					
	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
031-279	26967,77	4902,01	135453,73	63515,92	36564,97	No conocido
280-293/418-428	2996,42	492,17	15050,41	6377,10	3671,18	No conocido
294-315	2164,85	433,11	10873,61	5611,85	3230,64	No conocido
330-417	9116,76	1732,44	45791,69	22447,39	12922,56	No conocido
429-455	2773,28	531,54	13929,64	6887,27	3964,88	No conocido
456-489	3697,71	669,35	18572,85	8672,86	4992,81	No conocido
490-524	5100,29	689,04	25617,73	8927,94	5139,65	No conocido

Figura 3.31: Costos unitarios de mantenimiento por sección

Finalmente, los costos anuales de mantenimiento, calculados en base a los cálculos de las figuras 3.30 y 3.31 se muestran en la figura .

Mantenimientos	Costos totales anuales del nuevo plan en USD					
	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
031-279	60209,48	6604,26	13545,37	0,00	0,00	0,00
280-293/418-428	8799,71	617,96	1505,04	0,00	0,00	0,00
294-315	9558,12	623,21	1087,36	0,00	0,00	0,00
330-417	20391,08	2411,04	4579,17	0,00	0,00	0,00
429-455	8344,68	590,62	1392,96	0,00	0,00	0,00
456-489	14093,24	901,79	1857,29	0,00	0,00	0,00
490-524	21464,70	821,12	2561,77	0,00	0,00	0,00
Total:	142861,03	12570,00	26528,97	0,00	0,00	0,00
	181959,99					

Figura 3.32: Costos anuales en USD del plan de mantenimiento propuesto

El costo total del nuevo plan de mantenimiento es de 181959,99 $USD/anual$. Los porcentajes de cada tipo de mantenimiento con respecto al costo total son:

- Lavados: 142861,03 USD/año con un 78,51 % del costo total.
- IVP: 12570 USD/año con un 6,91 % del costo total.
- Reemplazo de aisladores de vidrio: 26528,97 USD/año con un 14,58 % del costo total.

Capítulo 4

COMPARACIÓN Y EXPANSIÓN DEL MODELO

Con el nuevo plan de mantenimiento teórico obtenido, se procede a su comparación con el plan de mantenimiento promedio realizado actualmente. Se compararán tanto las periodicidades y los costos de cada uno para luego dar paso a su posible aplicación en otras líneas de transmisión y a su ampliación para la aplicación de un modelo de mantenimiento más robusto.

4.1. Comparación del plan propuesto y el plan actual promedio de mantenimiento

Se ha demostrado que el plan de mantenimiento original de la figura 3.4 no es realizado plenamente. Los mantenimientos varían año a año dependiendo de las necesidades del activo y se ven afectados por factores logísticos y operacionales de las empresas subtratantes encargadas de realizarlos. Es por este motivo que se realizará la comparativa entre el plan de mantenimiento promedio entregado por los datos reales de mantenimiento y el nuevo plan de mantenimiento propuesto en la figura 3.29.

4.1.1. Periodicidades

En el desarrollo de esta comparación, hace falta mostrar los mantenimientos anuales tanto del plan actual (datos de mantenimiento) y los obtenidos mediante el método de maximización de disponibilidades. Dado a que los datos de mantenimiento toman en cuenta seis años, se presentaran los mantenimientos anuales por sección y una media de mantenimientos anuales con su respectiva desviación estándar. En las figuras 4.1, 4.3 y 4.5 las filas coloreadas representan las secciones de la línea que no fueron reemplazadas por aisladores siliconados y que serán el punto de comparación para cada tipo de mantenimiento.

Limpieza de aisladores

A continuación se muestran los cuadros resumen de los lavados del plan actual y del plan propuesto:

- **Plan actual (2012 - 2017)**

Lavados	2012	2013	2014	2015	2016	2017
001-018	6,00	6,22	6,00	7,00	7,00	3,00
019-030	6,00	6,00	6,00	7,00	7,00	5,83
031-279	2,00	1,17	2,00	2,00	1,48	2,48
280-293/418-428	2,00	2,00	2,44	2,44	2,76	3,00
294-316	2,05	2,00	2,87	3,92	6,26	4,91
317,318,328,329	0,00	1,67	4,25	3,00	6,00	1,00
319-327	1,56	2,45	4,78	2,00	6,67	3,34
330-417	2,00	1,00	2,00	2,00	2,15	2,00
429-455	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00	4,00
456-489	3,00	2,00	3,00	3,00	4,00	4,00
490-524	3,09	2,02	3,26	3,26	4,29	5,06

Figura 4.1: Lavados por año, 2012 - 2017

- **Comparación: Plan actual vs Plan propuesto**

Lavados	Promedio inspecciones	Desviacion estandard
001-018	5,87	1,48
019-030	6,31	0,54
031-279	1,86	0,46
280-293/418-428	2,44	0,40
294-316	3,67	1,69
317,318,328,329	2,65	2,22
319-327	3,47	1,94
330-417	1,86	0,42
429-455	2,50	0,84
456-489	3,17	0,75
490-524	3,50	1,05

(a) Lavados promedio por año, 2012 - 2017

Lavados	Inspecciones
031-279	2,2326
280-293/418-428	2,9367
294-315	4,4151
330-417	2,2367
429-455	3,0090
456-489	3,8113
490-524	4,2085

(b) Lavados por año, plan propuesto

Figura 4.2: Comparativa de lavados, Plan actual vs Plan propuesto

En la figura 4.2a se observa la variabilidad de los lavados de aisladores durante el periodo 2012 - 2017. La desviación estándar de los datos varía mucho entre cada sección y más aún en las secciones que se reemplazaron por aisladores siliconados. Las inspecciones propuestas en la figura 4.2b se encuentran dentro de los límites mostrados en las inspecciones promedio de la figura 4.2a y la variación estándar por sección.

Finalmente se observa una mayor periodicidad bajo el plan propuesto lo que aseguraría una máxima disponibilidad del activo. Esto es referido solamente a las periodicidades, el apartado de costos se analizará en las secciones siguientes.

Cabe destacar que este tipo de mantenimiento es el que más peso tiene sobre el modelo actual y el propuesto ya que es el tipo de mantenimiento que más se realiza sobre este activo.

Inspección visual terrestre (IVP)

A continuación se muestran los cuadros resumen de los lavados del plan actual y del plan propuesto:

- **Plan actual (2012 - 2017)**

IVP	2012	2013	2014	2015	2016	2017
001-018	0,00	0,00	1,00	2,00	0,00	2,00
019-030	0,00	0,00	1,00	3,00	0,00	2,00
031-279	0,00	0,00	0,46	2,38	0,00	2,01
280-293/418-428	0,00	0,00	0,44	2,00	0,00	2,08
294-316	0,00	0,00	0,74	2,48	0,00	1,96
317,318,328,329	0,00	0,00	0,50	1,00	0,00	2,00
319-327	0,00	0,00	1,00	2,44	0,00	2,11
330-417	0,00	0,00	1,00	2,01	0,00	2,00
429-455	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	2,00
456-489	0,00	0,00	1,47	1,00	0,00	2,38
490-524	0,00	0,00	1,26	1,00	0,00	2,03

Figura 4.3: IVP por año, 2012 - 2017

En la figura resumen 4.3 se muestra la variabilidad de este tipo de inspección. Existen años como el 2015 y 2017 en donde aproximadamente se realizaron 2 IVP en la mayoría de las secciones, pero otros como los años 2012, 2013 y 2016 en donde no se realizó en absoluto este tipo de inspección.

- **Comparación: Plan actual vs Plan propuesto**

IVP	Promedio inspecciones	Desviacion estandard
001-018	0,83	0,98
019-030	1,00	1,26
031-279	0,81	1,10
280-293/418-428	0,75	1,01
294-316	0,86	1,10
317,318,328,329	0,58	0,80
319-327	0,93	1,12
330-417	0,84	0,99
429-455	0,67	0,82
456-489	0,81	0,99
490-524	0,72	0,85

(a) IVP promedio por año, 2012 - 2017

IVP	Inspecciones
031-279	1,3473
280-293/418-428	1,2556
294-315	1,4389
330-417	1,3917
429-455	1,1111
456-489	1,3473
490-524	1,1917

(b) IVP por año, Plan propuesto

Figura 4.4: Comparativa de IVP, Plan actual vs Plan propuesto

Con la variabilidad mostrada en la figura 4.3, la figura 4.4a nos muestra que la desviación estándar es incluso más grande que el valor promedio. Según la optimización realizada, las periodicidades por cada sección de la figura 4.4b se mantienen parejas y adoptan valores de entre 1,1111 y 1,4389 inspecciones por año.

Es destacable que los datos entreguen una periodicidad tan parecida para este tipo de inspeccion.

Reemplazo de aisladores de vidrio

A continuación se muestran los cuadros resumen de los reemplazos del plan actual y del plan propuesto:

- **Plan actual (2012 - 2017)**

Reemplazo	2012	2013	2014	2015	2016	2017
001-018	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
019-030	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
031-279	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
280-293/418-428	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
294-316	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
317,318,328,329	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	3,00
319-327	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
330-417	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
429-455	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
456-489	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
490-524	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 4.5: Reemplazos por año, 2012 - 2017

Para este caso, solo se indicaron reemplazos por aisladores de vidrio durante los años 2016 y 2017 para la sección 317, 318, 328, 329. Si existieran más datos de los reemplazos de cadenas de aisladores, estos no fueron entregados para realizar este estudio.

- **Comparación: Plan actual vs Plan propuesto**

Reemplazo	Promedio inspecciones	Desviacion estandard
001-018	0,00	0,00
019-030	0,00	0,00
031-279	0,00	0,00
280-293/418-428	0,00	0,00
294-316	0,00	0,00
317,318,328,329	1,17	1,83
319-327	0,00	0,00
330-417	0,00	0,00
429-455	0,00	0,00
456-489	0,00	0,00
490-524	0,00	0,00

(a) Reemplazos promedio por año, 2012 - 2017

Reemplazo	Inspecciones
031-279	0,1000
280-293/418-428	0,1000
294-315	0,1000
330-417	0,1000
429-455	0,1000
456-489	0,1000
490-524	0,1000

(b) Reemplazos por año, plan propuesto

Figura 4.6: Comparativa de reemplazos, Plan actual vs Plan propuesto

Aunque los datos no fueron entregados por Transelec, es importante realizar un intercambio de aisladores de vidrio cuando la vida útil de este activo sea cumplida. Según la bibliografía ([15], [16]), se ha tomado una vida útil de 10 años la cual puede ser ajustada por Transelec en base a su experiencia en el mantenimiento de la línea. Esta periodicidad se incorpora dentro del modelo obteniéndose un cambio de el 10 % de los aisladores por año según se muestra en la figura 4.4b.

Lamentablemente dada la cantidad de datos disponibles, no es posible realizar comparativas más en profundidad.

Coronografías, termografías y siliconado

Los cuadros resumen de coronografías y termografías se muestran en las figuras 4.7 y 4.8.

- **Coronografías**

Coronografia	2012	2013	2014	2015	2016	2017
001-018	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
019-030	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
031-279	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
280-293/418-428	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
294-316	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
317,318,328,329	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
319-327	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
330-417	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
429-455	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
456-489	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
490-524	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 4.7: Coronografías por año y por sección, 2012 - 2017

Para el caso de las coronografías, entre los años 2012 - 2017, estas se realizaron sobre los aisladores que han sido reemplazados por aisladores siliconados. En el caso de las coronografías realizadas en la sección 294 - 316, se realizaron 6 coronografías solamente en la estructura 316, la cual también fue reemplazada por aisladores siliconados. Para el nuevo modelo se continuará con la no-realización de este tipo de inspecciones para la totalidad de las estructuras que no han sido reemplazadas por aisladores poliméricos.

- **Termografías**

Termografia	2012	2013	2014	2015	2016	2017
001-018	0,00	0,06	0,22	0,00	0,22	0,00
019-030	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00
031-279	0,00	0,02	0,00	0,03	0,02	0,00
280-293/418-428	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
294-316	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
317,318,328,329	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
319-327	0,00	0,00	0,00	0,44	0,00	0,00
330-417	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
429-455	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
456-489	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00
490-524	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00

Figura 4.8: Termografías por año y por sección, 2012 - 2017

La frecuencia mostrada en los datos arroja una muy baja realización de termografías. Las frecuencias más altas de este tipo de mantenimiento se encuentran en las secciones que se reemplazaron por

aisladores siliconados y las frecuencias en las otras secciones que no han sido reemplazadas son muy bajas y no se repiten a lo largo de los años. Por estas razones, tampoco se incluyen las termografías dentro del nuevo plan de mantenimiento propuesto.

Transelec se encuentra en la libertad de re-analizar los datos y realizar modificaciones si su experiencia en el mantenimiento de la línea lo estima conveniente.

- **Siliconados**

  Finalmente los reemplazos por aisladores siliconados no serán incluidos en el plan final ya que estos reemplazos terminaran el año 2017. Es libertad de Transelec de considerar la instalación de aisladores siliconados en otras partes de la línea.

Plan general anual

Las frecuencias anuales de inspeccion general de la figura 4.9a han sido calculadas introduciendo los pesos de cada sección considerando la cantidad de estructuras. Por su parte la frecuencia anual general de inspección de la figura 4.9b ha sido calculada directamente del resultado de la frecuencia óptima mensual obtenida con el modelo de optimización.

años	Inspecciones
2012	2,38
2013	1,72
2014	3,30
2015	4,66
2016	2,81
2017	5,34
Promedio	3,37

(a) Inspecciones anuales generales promedio, 2012 - 2017

Frecuencias	
0,46	5,51
1/mes	1/año

(b) Inspecciones anuales propuestas

Figura 4.9: Comparativa de inspecciones totales anuales, Plan actual vs Plan propuesto

Según los cálculos, las inspecciones son un 63,50 % más altas que las inspecciones realizadas en promedio entre los años 2012 - 2017. Según el modelo, la línea presenta niveles de mantenimiento más bajos que los deseados. Esto se traducirá en un costo más elevado en el mantenimiento de esta línea de transmisión. Los costos de mantenimiento para estas distintas frecuencias anuales de inspección se muestran en la sección siguiente.

4.1.2. Costos

Los costos ya han sido obtenidos anteriormente y se resumen en el cuadro 4.10.

Plan actual, 2012 - 2017	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
Costo medio/anual USD	139551,52	8304,28	2843,57	4009,92	1154,22	No conocido
	155863,51					
Porcentajes	89,53%	5,33%	1,82%	2,57%	0,74%	No conocido
	100,00%					

(a) Costo anual promedio plan actual, 2012 - 2017

Plan propuesto	Lavados	IVP	Reemplazo	Coronografias	Termografias	Siliconado
Costo medio/anual USD	142861,03	12570,00	26528,97	0,00	0,00	0,00
	181959,99					
Porcentajes	78,51%	6,91%	14,58%	0,00%	0,00%	No conocido
	100,00%					

(b) Costo anual plan propuesto

Figura 4.10: Comparativa de costos anuales, Plan actual vs Plan propuesto

Los costos del plan promedio aplicado entre los años 2012 y 2017 y el plan propuesto son de 155863,51 USD/año y 181959,99 USD/año respectivamente. El plan propuesto es un 16,74$ más caro que el plan aplicado entre el 2012 y 2017, esto sin considerar el costo del intercambio de los aisladores por aisladores siliconados.

Este nuevo plan considera las periodicidades de inspección optimizadas por el método expuesto en este trabajo.

4.2. Ampliación del modelo

Al utilizar un modelo de optimización como el presente en este trabajo, hace falta adaptarlo a la calidad de los datos presentes. Lamentablemente no siempre se tiene la calidad óptima de datos y el modelo debe adaptarse, es por esto que en la ampliación del modelo se plantea, por una parte, la mejora en la toma de datos para así mejorar la aplicación del modelo y, por otra, la aplicación de un modelo más robusto que necesita una cantidad de datos incluso mayor como es el mantenimiento basado en condiciones.

4.2.1. Optimización del modelo planteado

Existen unas tablas de evaluación de datos, realizadas en conjunto por Montgomery, Hodkiewicz y Jardine en donde se exponen los datos necesarios para llevar a cabo ciertos modelos de gestión de activos. A continuación se explicarán los datos necesarios para una óptima aplicación del modelo de cálculo de intervalos de inspección planteado en este trabajo. Las tablas se encuentran en los anexos, sección 5.7, figura 5.6.

Los datos se presentan a continuación:

- **Identificación del activo:** Se debe contar con una apropiada identificación. Esto quiere decir un número de serie, un nombre asociado al activo y las partes del activo. Para este trabajo, la línea Cóndores - Parinacota cuenta con una identificación por estructura en donde se conoce también la cantidad de aisladores. Todos los mantenimientos están referidos de esta forma y se menciona la estructura donde se aplicó. Sin embargo, en la mayoría de las veces no se conoce la ubicación de la

falla según los informes de falla del CEN resumidos en la figura 3.5. Esto último llevó a a adaptar el modelo para obtener una frecuencia general, para luego traducirlo a una frecuencia por sección.

  - *Pista de mejora:* Mejorar la identificación del activo en donde ocurre la falla.

- **Modo de falla:** Los modos de falla no son conocidos la totalidad de las veces. Existen eventos de falla donde se conoce un flashover, pero en otros podría ser por otros factores. Las hipótesis que se tomaron para adaptar el modelo sin saber todos los modos de falla se exponen en la sección 3.3.2.

  - *Pista de mejora:* Identificar el modo de falla en un porcentaje mayor de las veces.

- **Indicación de la suspensión:** En este punto, incluso sin conocerse el modo de falla, la suspensión del servicio está bastante bien explicada en los informes de falla.

  - *Pista de mejora:* Ninguna

- **Fecha de instalación del activo:** En este caso, no se conoce la fecha de instalación del activo. Por esta razón, en el modelo propuesto no se puede definir cuando se realizará el primer reemplazo de aisladores de vidrio dado que no se conoce la vida útil restante del activo al momento de proponer el modelo. Se deberá utilizar la experiencia en mantenimiento de Transelec para conocer el momento del primer reemplazo de aisladores sobre la línea.

  - *Pista de mejora:* Guardar la fecha de reemplazo de aisladores de vidrio en los informes de mantenimiento.

- **Tiempo de utilización del activo al ser instalado:** No se especifica en ningún informe, pero la instalación de aisladores se realiza con elementos nuevos sin uso previo.

  - *Pista de mejora:* Ninguna

- **Fecha del evento de falla:** La fecha y la hora del evento de falla están bien explicadas en los informes de falla del CEN.

  - *Pista de mejora:* Ninguna

- **Tiempo de utilización al momento de la falla:** Al no conocerse la fecha de instalación de los aisladores, no se conoce tampoco el tiempo de utilización al momento de la falla. No fue trascendental conocer este dato para el desarrollo del modelo presentado.

  - *Pista de mejora:* Ninguna

- **Costo del mantenimiento preventivo:** Se conoce el costo de todos los tipos de mantenimiento. Los costos de los aisladores nuevos no fueron entregados por la empresa para el desarrollo del modelo pero fueron encontrados de manera externa.

  - *Pista de mejora:* Ninguna

- **Costo del mantenimiento luego de la falla:** No se tiene conocimiento de un costo distinto al costo de mantenimiento regular. Si existiera, este no fue informado. Tampoco se conoce un costo especifico de falla. Es por esto que la optimización se realiza en base a las disponibilidades y no a los costos.

  - *Pista de mejora:* Diferenciar los costos de mantenimiento regular de los costos de un mantenimiento de reparación luego de ocurrida una falla.

- **Tiempo de baja del activo por mantenimiento preventivo:** Todos los mantenimientos se realizan con línea viva. No existen tiempos de baja por mantenimiento preventivo.

  - *Pista de mejora:* Ninguna

- **Tiempo de baja del activo por mantenimiento luego de la falla:** Este apartado se extrae directamente desde los informes de falla y consta del tiempo de restablecimiento del suministro eléctrico.

  - *Pista de mejora:* Ninguna

- **Hora y fecha de reparación/inspección:** Sólo en los informes de lavado de aisladores se encontró toda la información necesaria de fecha, hora de inicio y hora de término de la inspección. En los otros tipos de mantenimiento la fecha era conocida pero no el tiempo de inspección.

  - *Pista de mejora:* Indicar la fecha, la hora de inicio y la hora de fin para todos los mantenimientos realizados.

Estas indicaciones permitirían realizar un calculo de frecuencia óptima de inspecciones con mayor precisión. Las acciones para realizarlo, en el caso de los mantenimientos, se podría realizar simplemente con un cambio en la planilla de toma de datos de los informes de mantenimiento. Para las fallas las acciones son más complicadas ya que se hace necesario la instalación de equipos que ayuden a definir la localización y el modo de falla.

4.2.2. Aplicación de un modelo más robusto: Mantenimiento basado en condiciones

La detección y diagnóstico de problemas en una máquina sin detener su funcionamiento es uno de los métodos de mantenimiento más completos. Según esto, se pueden detectar los problemas anticipadamente cuando los efectos que causan la falla son incipientes y no afectan por lo tanto el funcionamiento del equipo, además permite diagnosticar la naturaleza del problema con el activo en funcionamiento. El objetivo del monitoreo de la condición del activo es recopilar el mayor número de datos representativos de su funcionamiento con la finalidad de detectar las fallas en sus primeras etapas.

Datos necesarios para el modelo

Los datos necesarios son los mismos que para nuestro modelo pero también se le adiciona lo siguiente (anexo 5.7):

- **Nombre y valor de una inspeccion que mida las condiciones del activo:** Deben ser mediciones que indiquen el estado de "salud" del activo con un valor comparable para la toma de decisiones de mantenimiento.

Algunas formas de monitorear las condiciones del estado de un aislador pueden ser, por ejemplo, la medición de un indicador de polvo discrecional (DDGI) que mida las condiciones ambientales de agentes contaminantes, la medición de la densidad de deposito de sal equivalente (ESDD) o la densidad del deposito no soluble (NSDD) para medir la contaminación directamente sobre un aislador de muestra o directamente

medir el estado de la aislación por métodos de medida de la resistencia de fuga, coronografías, termografías, resistividad, etc. Todos estos métodos han sido explicados más en detalle en el marco teórico.

Ha sido ofrecido a Transelec un dispositivo que realiza este tipo de medidas llamado MetrySense 4000 que cuenta de:

1. Un sensor de corrientes inducidas en el cable de tierra por las bandas de arco seco producidas en el proceso de contaminación del aislador,
2. una unidad de adquisición de datos "Wireless DAQ" que recoge los valores del sensor y los comunica de manera inalámbrica,
3. un "Gateway" o dispositivo de comunicación que conecta los "Wireless DAQ" con el servidor central.
4. El servidor central recopila los datos de todos los DAQ y los envía vía inalámbrica a la empresa.

El dispositivo entrega el estado de los aisladores en tiempo real para la toma de acciones con respecto a los mantenimientos.

4.3. Aplicación a otras líneas de transmisión

La aplicación de estos métodos de mantenimiento es realizable en cualquier línea de transmisión. Para aquellas con condiciones de contaminación similar, un modelo parecido es aplicable. Para aquellas con otras condiciones de contaminación, como el producido por industrias químicas cercanas, mayor presencia de lluvias, neblina o nieve o distintas condiciones de temperatura, los métodos óptimos y los datos necesarios deben ser analizados caso a caso. Puede ser que para aplicar un método de mantenimiento basado en condiciones "CBM", explicado en la sección 2.2.2, se deban medir otros tipos de condiciones tanto ambientales como directamente sobre los aisladores.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

El trabajo expuesto en esta tesis ha tenido distintas etapas. La realización de una práctica profesional en la cual se estudió el caso particular de esta línea de transmisión, la investigación sobre los factores de falla y los datos disponibles, la investigación sobre los distintos modelos de mantenimiento existentes, la selección del modelo de mantenimiento según la disponibilidad de los datos, la pedida de datos de mantenimiento a la zona norte de Transelec y finalmente el desarrollo del modelo de mantenimiento y su documentación escrita. A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo.

Se ha cumplido el objetivo general de proponer un modelo de mantenimiento para los aisladores de la línea 220kV Cóndores - Parinacota. Basándose en los datos y en una adaptación del modelo de cálculo de intervalos de inspeccion se ha logrado encontrar una frecuencia general de inspeccion que, gracias a los datos de mantenimiento entre los años 2012 y 2017, ha sido traducida a frecuencias por tipo de mantenimiento y por sección de la línea para así entregar un plan de mantenimiento anual completo, costos incluidos.

Los factores de falla relevantes asociados a la contaminación de los aisladores presentes en esta zona han sido identificados, el estado del arte de las tecnologías de inspeccion y mantenimiento para líneas bajo condiciones similares ha sido investigado y todo esto ha sido documentado en el marco teórico de este trabajo.

Los costos de mantenimiento no han podido ser optimizados debido a la falta de los costos de falla, pero si se han optimizado los mantenimientos en base a la disponibilidad de la línea de transmisión con un respectivo presupuesto. Este presupuesto se ha comparado con la media del costo anual de los mantenimientos entre 2012 y 2017, resultando un costo más elevado como resultado de la introducción del ítem "reemplazo de aisladores de vidrio" como un elemento estable dentro de la planificación del mantenimiento. La logística de los mantenimientos ha sido mejorada con la decisión de le empresa de instalar aisladores siliconados en las secciones de más difícil acceso como la 317, 318, 328, 329 y de mayor frecuencia de inspecciones como lo son las otras 3 secciones siliconadas.

Los lineamientos para la toma de datos más completa se ha mencionado haciendo especial énfasis en la calidad de estos. Para futuros trabajos similares, hace falta tener la mejor calidad de datos posibles. La idea de expandir este modelo a un modelo que considere también las condiciones de los aisladores ha sido propuesta en conjunto con algunas ideas posibles de toma de datos.

De esta forma, se concluye que los objetivos generales y específicos han sido cumplidos y, a partir de ahora, se exponen también otras conclusiones generales.

Varias hipótesis y adaptaciones del modelo óptimo de cálculo de intervalos de inspección han sido realizadas. La experiencia en el mantenimiento de esta línea debe ser también un punto importante a tomar en cuenta para el análisis final de la empresa sobre los resultados expuestos en este trabajo. Las

periodicidades están, bajo estos supuestos, sujetas a cambios. Lo mismo sucede con la implementabilidad de este plan tomando en cuenta los costos más elevados que los que se tienen con el plan actual.

Se debe hacer especial énfasis en la documentación de las actividades de mantenimiento. Las fichas de toma de datos deberían ser actualizadas para incluir, sobre todo, datos sobre la duración de las inspecciones. Esta simple acción puede ser muy útil si alguna vez en el futuro se decide realizar un replanteamiento de los mantenimientos a nivel general en las líneas de transmisión de Transelec.

Dado a que la periodicidad más alta de mantenimiento es de 10 años (reemplazo de aisladores de vidrio) se puede plantear un mantenimiento para los próximos 10 años pero, para eso, debe conocerse la fecha de instalación de los aisladores de vidrio actuales. Con la experiencia de mantenimiento de la empresa se podría definir una fecha de comienzo para realizar este plan de mantenimiento.

Estos resultados están limitados a la utilización de los mismos aisladores. Si la distancia de fuga, el material u otros factores se ven afectados, los cálculos de frecuencia óptima no son aplicables.

Una de las partes más complejas de este trabajo fue la recopilación de los datos de mantenimiento, la cual tomó aproximadamente 4 meses después de que estos fueron pedidos.

Para concluir este trabajo, me gustaría destacar de forma personal el aporte a la formación de un alumno de ingeniería eléctrica, cuya formación esta centrada en otros asuntos, de un trabajo sobre la gestión de activos y agradezco la oportunidad brindada por Transelec para realizar mi trabajo de memoria sobre este tema.

Bibliografía

[1] TASK FORCE CIGRE. 33.04. 01. *Polluted insulators: a review of current knowledge*, (158), 2000.

[2] SM Gubanski, Andreas Dernfalk, Johan Andersson, and Henrik Hillborg. Diagnostic methods for outdoor polymeric insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 14(5), 2007.

[3] JL Fierro-Chavez, I Ramirez-Vazquez, and G Montoya-Tena. On-line leakage current monitoring of 400 kv insulator strings in polluted areas. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 143(6):560–564, 1996.

[4] JC Quintana Suarez, M Martínez Melgarejo, J Romero Mayoral, MA Quintana Suárez, F Díaz Reyes, and J Cruz Norro. Modelo predictivo para la determinación de contaminación salina en aisladores eléctricos. In *9th. Spahish Portuguese Congress on Electrical Engineering*, pages 1–5, 2005.

[5] FABIÁN ENRIQUE CONCHA CARTES. Optimización del plan de mantenimiento proventivo anual de transelec sa para el norte grande basado en análisis técnico y estadístico. 2016.

[6] Herman M Schneider, James F Hall, George Karady, and Joe Renowden. Nonceramic insulators for transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(4):2214–2221, 1989.

[7] Muhsin Tunay Gençoğlu and Mehmet Cebeci. The pollution flashover on high voltage insulators. *Electric Power Systems Research*, 78(11):1914–1921, 2008.

[8] PJ Lambeth. Effect of pollution on high-voltage outdoor insulators. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, volume 118, pages 1107–1130. IET, 1971.

[9] Ahmad S Ahmad, PS Ghosh, Syed Abdul Kader Aljunid, and Hussein Ahmad. Modeling of various meteorological effects on contamination level for suspension type of high voltage insulators using ann. In *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*, volume 2, pages 1030–1035. IEEE, 2002.

[10] S Fernando, K Wong, and W Rowe. Detection of corona and dry-band arc discharges on nano-composite epoxy insulators using rf sensing. *Progress In Electromagnetics Research*, 125:237–254, 2012.

[11] GH Vaillancourt, S Carignan, and C Jean. Experience with the detection of faulty composite insulators on high-voltage power lines by the electric field measurement method. *IEEE Transactions on power delivery*, 13(2):661–666, 1998.

[12] DY Kwok, T Gietzelt, K Grundke, H-J Jacobasch, and ANDA W Neumann. Contact angle measurements and contact angle interpretation. 1. contact angle measurements by axisymmetric drop shape analysis and a goniometer sessile drop technique. *Langmuir*, 13(10):2880–2894, 1997.

[13] RS Gorur, E Cherney, C De Tourreil, D Dumora, R Harmon, H Hervig, B Kingsbury, J Kise, T Orbeck, K Tanaka, et al. Protective coatings for improving contamination performance of outdoor high voltage ceramic insulators. *IEEE transactions on power delivery*, 10(2):924–933, 1995.

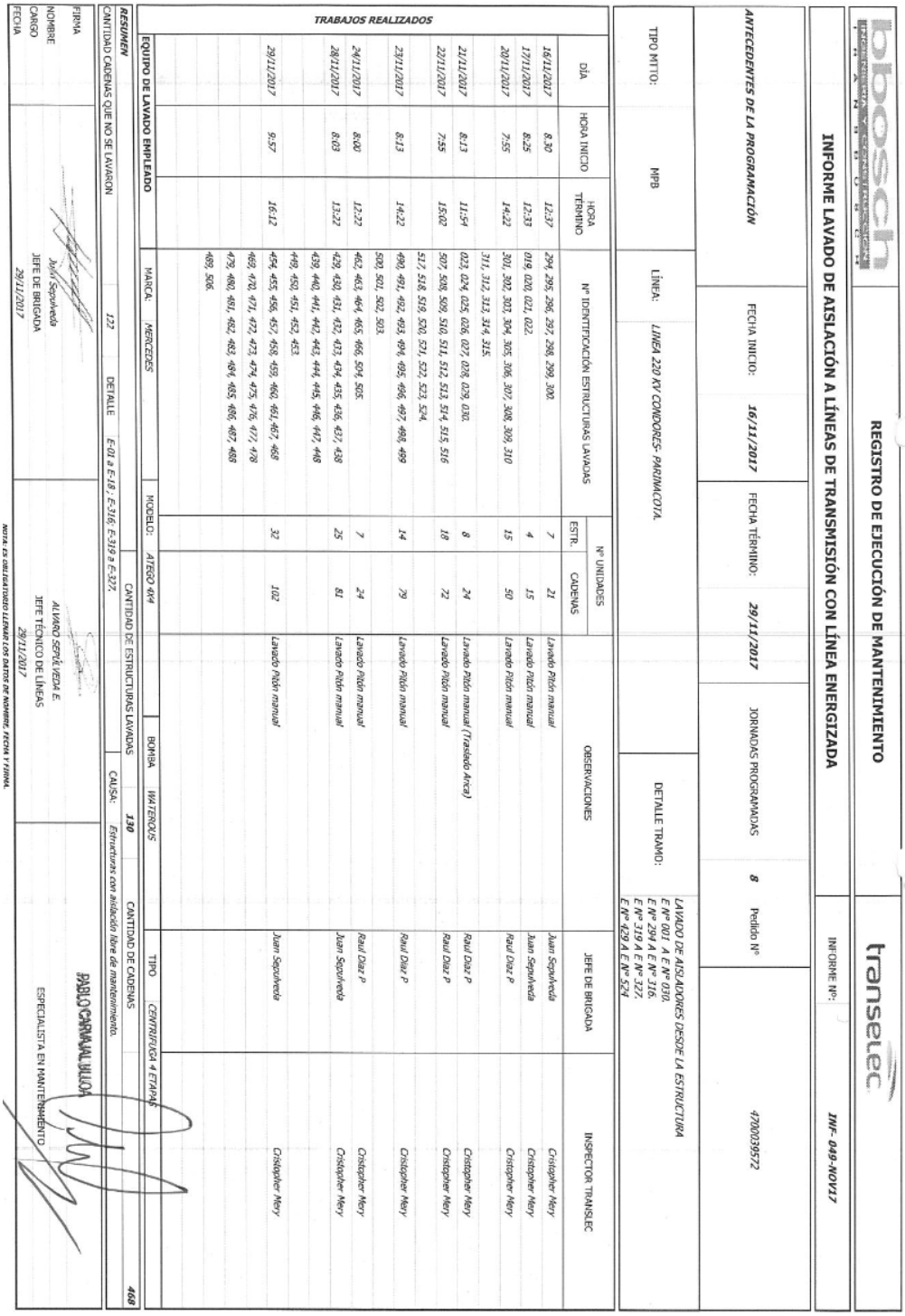
[14] IEC. 815: Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions, 1986.

[15] Paul Taklaja, Petri Hyvönen, Jaan Niitsoo, Ivo Palu, and Joni Klüss. Impulse characteristics of 24 kv overhead line pin insulators. In *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on*, pages 545–549. IEEE, 2013.

[16] Farooq Ahmed, Faisal Huda, Seraj Huda, and John Barr. Coated composite high voltage electrical insulator, June 19 2003. US Patent App. 10/014,790.

ANEXOS

5.1. Ejemplo de informe de lavados



bbosch

REGISTRO DE EJECUCIÓN DE MANTENIMIENTO

transelec

INFORME LAVADO DE AISLACIÓN A LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON LÍNEA ENERGIZADA

INFORME Nº: INF- 049-NOV17

ANTECEDENTES DE LA PROGRAMACIÓN

FECHA INICIO: 16/11/2017 FECHA TÉRMINO: 29/11/2017 JORNADAS PROGRAMADAS 8 Pedido Nº 4700039572

TIPO MTTO: MPB LÍNEA: LINEA 220 KV CONDORES- PARINACOTA.

DETALLE TRAMO: LAVADO DE AISLADORES DESDE LA ESTRUCTURA E Nº 001 A E Nº 030. E Nº 294 A E Nº 316. E Nº 319 A E Nº 327. E Nº 429 A E Nº 524

TRABAJOS REALIZADOS

DÍA	HORA INICIO	HORA TÉRMINO	Nº IDENTIFICACIÓN ESTRUCTURAS LAVADAS	Nº UNIDADES ESTR.	Nº UNIDADES CADENAS	OBSERVACIONES	JEFE DE BRIGADA	INSPECTOR TRANSLEC
16/11/2017	8:30	12:37	294, 295, 296, 297, 298, 299, 300.	7	21	Lavado Pitón manual	Juan Sepulveda	Cristopher Mery
17/11/2017	8:25	12:33	019, 020, 021, 022.	4	15	Lavado Pitón manual	Juan Sepulveda	Cristopher Mery
20/11/2017	7:55	14:22	301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310	15	50	Lavado Pitón manual	Raul Diaz P	Cristopher Mery
			311, 312, 313, 314, 315.					
21/11/2017	8:13	11:54	023, 024, 025, 026, 027, 028, 029, 030.	8	24	Lavado Pitón manual (Traslado Arica)	Raul Diaz P	Cristopher Mery
22/11/2017	7:55	15:02	507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516	18	72	Lavado Pitón manual	Raul Diaz P	Cristopher Mery
			517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524.					
23/11/2017	8:13	14:22	490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499	14	79	Lavado Pitón manual	Raul Diaz P	Cristopher Mery
			500, 501, 502, 503.					
24/11/2017	8:00	12:22	462, 463, 464, 465, 466, 504, 505.	7	24	Lavado Pitón manual	Raul Diaz P	Cristopher Mery
28/11/2017	8:03	13:22	429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438	25	81	Lavado Pitón manual	Juan Sepulveda	Cristopher Mery
			439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448					
			449, 450, 451, 452, 453.					
29/11/2017	9:57	16:12	454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 467, 468	32	102	Lavado Pitón manual	Juan Sepulveda	Cristopher Mery
			469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478					
			479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488					
			489, 506.					

EQUIPO DE LAVADO EMPLEADO

MARCA: MERCEDES MODELO: ATEGO 4X4 BOMBA WATEROUS TIPO CENTRIFUGA 4 ETAPAS

RESUMEN

CANTIDAD DE ESTRUCTURAS LAVADAS 130 CANTIDAD DE CADENAS 468

CANTIDAD CADENAS QUE NO SE LAVARON 122 DETALLE E-01 a E-18 ; E-316; E-319 a E-327. CAUSA: Estructuras con aislación libre de mantenimiento.

FIRMA

NOMBRE Juan Sepulveda

CARGO JEFE DE BRIGADA

FECHA 29/11/2017

ALVARO SEPÚLVEDA E.
JEFE TÉCNICO DE LÍNEAS
29/11/2017

PABLO CARVAJAL ULLOA
ESPECIALISTA EN MANTENIMIENTO

NOTA: ES OBLIGATORIO LLENAR LOS DATOS DE NOMBRE, FECHA Y FIRMA.

Figura 5.1: Ejemplo de un informe de lavados, linea 1x220 Cóndores - Parinacota

5.2. Ejemplo de informe IVP

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	U	V	W
1	Línea	Tramo Inici	Tramo Fin	Grupo	Subgrupo	Código	Tipo Est.	Circuito	Tipo	Ubicación	Inf.1	Inf.2	Inf.3	Inf.4	Prioridad	Fecha	Hora
2	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-188	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Izquierda	Vidrio	Buenos: 16	Fallo: 1	Sin observacion	Baja-M3	31/08/2017	13:29:26
3	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-79	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Superior	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	31/08/2017	07:45:18
4	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-221	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Cadena izq	Vidrio	Buenos: 16	Fallo: 1	Sin observacion	Baja-M3	09/09/2017	09:25:06
5	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-229	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Inferior izq	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Sin observacion	Baja-M3	09/09/2017	10:02:58
6	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-238	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Inferior izq	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Sin observacion	Baja-M3	09/09/2017	10:34:32
7	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-200	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Inferior izq	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Sin observacion	Baja-M3	10/09/2017	09:31:29
8	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-220	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Cadena inf	Vidrio	Buenos: 16	Fallo: 1	Sin observacion	Baja-M3	10/09/2017	10:28:12
9	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-411	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Inferior izq	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Sin observacion	Baja-M3	24/09/2017	11:08:41
10	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-398	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Inferior del	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Sin observacion	Baja-M3	24/09/2017	11:44:08
11	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-394	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Inferior del	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Sin observacion	Baja-M3	24/09/2017	11:59:47
12	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-432	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Superior	Vidrio	Buenos: 14	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	17/10/2017	10:57:47
13	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-467	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Superior	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	17/10/2017	10:57:47
14	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-468	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Superior	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	17/10/2017	10:57:47
15	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-474	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Inferior	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	17/10/2017	10:57:47
16	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-480	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Media	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	17/10/2017	10:57:47
17	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-486	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Inferior	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	17/10/2017	10:57:47
18	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-487	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Inferior	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	17/10/2017	10:57:47
19	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-489	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Superior	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	17/10/2017	10:57:47
20	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-493	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Inferior	Vidrio	Buenos: 14	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	17/10/2017	10:57:47
21	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-514	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Superior	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	17/10/2017	10:57:47
22	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-449	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Media	Vidrio	Buenos: 14	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	14/10/2017	11:41:26
23	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-464	Suspensión	Circuito 2	Quebrado	Inferior	Vidrio	Buenos: 14	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	14/10/2017	12:25:48
24	Condores - Condores	Parinacota	Parinacota	Aisladores	Daño Fisico	E-515	Suspensión	Circuito 1	Quebrado	Superior	Vidrio	Buenos: 15	Fallo: 1	Dañado/Falta	Baja-M3	15/10/2017	11:24:29

Figura 5.2: Ejemplo de un informe IVP, linea 1x220 Cóndores - Parinacota

5.3. Ejemplo de informe termografias

TRANSELEC S.A. (CONTRATISTA)	REGISTRO DE EJECUCIÓN DE MANTENIMIENTO	TRANSELEC S.A. (EMPRESA MANDANTE)

INFORME DE TERMOGRAFÍA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

ANTECEDENTES GENERALES — OM: 8134089

FECHA EJECUCIÓN:	06.08.15	INFORME Nº:	4	PEDIDO SAP Nº		CÓDIGO DE SERVICIO:	No hay
ADMINISTRACIÓN:	ANTOFAGASTA	LÍNEA	Línea 220 kV Condores-Parinacota				
JEFE FAENA:	Marco Palmarola	INSPECTOR DE TRANSELEC:					

TRABAJOS REALIZADOS

DATOS DE LA PRUEBA				ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN CON OBSERVACIÓN											
Hora	Vano - estructura	Carga en %	Temp. Ambiente (°C)	Nº de referencia	Sin observaciones	En fase superior - norte - cordillera	En fase media	En fase inferior - sur - cordillera	Identificación especifica	Temp. medida (°C)	Temp. punto adyacente (°C)	Diferencia (°C)	Nivel de Gravedad: Carga > 50%	Nivel de Gravedad: Carga < 50% (aplica Anexo 1)	Nº de referencia respecto al archivo del equipo de termografía
12:50	Est.Nº 197	22	25	1	X				Estructura Nº 197. Anclaje. Tipo:22A30.1	13,5	13	0,5		NORMAL	IR_1195
13.05	Est.Nº 202	22	25	2	X				Estructura Nº 202. Anclaje. Tipo:22A30.1	16	8,6	7,4		NORMAL	IR_1197
13:08	Est.Nº 203	22	25	3	X				Estructura Nº 203. Anclaje. Tipo:22A70.1	9	7,3	1,7		NORMAL	IR_1199
13:28	Est.Nº 220	22	25	4	X				Estructura Nº 220. Anclaje. Tipo:22A30.1	14,4	9,9	5		NORMAL	IR_1101
14:05	Est.Nº 221	22	25	5	X				Estructura Nº 221. Anclaje. Tipo:22A30.1	11,8	10,6	1,2		NORMAL	IR_1203
14:17	Est.Nº 222	22	25	6	X				Estructura Nº 222. Anclaje. Tipo:22A30.1	12,5	9,9	2,6		NORMAL	IR_1205
14:32	Est.Nº 235	22	25	7	X				Estructura Nº 235. Anclaje. Tipo:22A30.1	13,2	7,7	6		NORMAL	IR_1207
16:31	Est.Nº 319	22	25	8	X				Estructura Nº 319. Anclaje. Tipo:22A30.1	12,8	9,5	3,3		NORMAL	IR_1209
16:44	Est.Nº 320	22	25	9	X				Estructura Nº 320. Anclaje. Tipo:22A30.1	12,9	12,6	0,3		NORMAL	IR_1211
16:54	Est.Nº 322	22	25	10	X				Estructura Nº 322. Anclaje. Tipo:22A30.1	10	9,9	0		NORMAL	IR_1213
17:09	Est.Nº 326	22	25	11	X				Estructura Nº 326. Anclaje. Tipo:22A30.1	10,4	8,1	2,3		NORMAL	IR_1215
18:17	Est.Nº 330	22	25	12	X				Estructura Nº 330. Anclaje. Tipo:22A30.1	9,2	7,6	1,6		NORMAL	IR_1217
18:48	Est.Nº 342	22	25	13	X				Estructura Nº 342. Anclaje. Tipo:22A30.1	15,3	11,6	4		NORMAL	IR_1219
19:05	Est.Nº 359	22	20	14	X				Estructura Nº 359. Anclaje. Tipo:22A70.1	14,7	12,7	2		NORMAL	IR_1221
19:18	Est.Nº 374	22	20	15	x				Estructura Nº 374. Anclaje. Tipo:22A30.1	15,5	13,9	1,6		NORMAL	IR_1223
19:35	Est.Nº 390	22	20	16	x				Estructura Nº 390. Anclaje. Tipo:22A30.1	11,5	10,5	1		NORMAL	IR_1225

EQUIPO DE TERMOGRAFÍA USADO

MARCA:	FLIR	MODELO:	P-60	Nº DE SERIE:	1195342

OBSERVACIONES

Se realizo inspección Termografica a los terminales de compresión en las estructuras de anclaje de la línea Cóndores-Parinacota señalados; no encontrandose anormalidades.

CONCLUSIONES	LISTADO DE PUNTOS CON OBSERVACIONES (colocar Nº de referencia)
PUNTOS QUE SE DEBE REPETIR LA PRUEBA DENTRO DE 12 MESES	
PUNTOS QUE SE DEBE REPETIR LA PRUEBA DENTRO DE 6 MESES	
PUNTOS QUE SE DEBEN CORREGIR DENTRO DE 30 DIAS	
PUNTOS QUE SE DEBEN CORREGIR DE INMEDIATO	

FIRMA			
NOMBRE	Marco Palmarola	No corresponde	Andrés Vásquez A.
CARGO	JEFE DE FAENA	JEFE TÉCNICO CONTRATISTA	INSPECTOR DE TRANSELEC
FECHA	01/09/15		01.09.14

Figura 5.3: Ejemplo de un informe de termografias, linea 1x220 Cóndores - Parinacota

5.4. Ejemplo de informe coronografias

transelec
Uniendo a Chile con Energía

REGISTRO DE EJECUCIÓN DE MANTENIMIENTO

INFORME DE CORONOGRAFÍA EN LINEAS DE TRANSMISION

ANTECEDENTES GENERALES

FECHA EJECUCIÓN	*13y14.07.2017*	INFORME N°	*2*	ORDEN DE MANT. SAP	
ADMINISTRACION	*Antofagasta*			LINEA	*L.220 kV. Condores-Parinacota*
INSPECTOR	*Marco Palmarola*			SUPERVISOR	*Andrés Vásquez Acevedo*

TRABAJOS REALIZADOS

DATOS DE LA PRUEBA					ELEMENTOS DE LA INSTALACION CON OBSERVACIÓN										
ID	Hora	Vano - Estructura	Humedad %	T. Ambiente °C	Tipo Estructura	En fase Superior Derecha	En Fase Inferior Derecha	En Fase Inferior Izquierda	Identificación Específica	Ganancia	Fotones por Minuto	Conteo Bajo (0 - 1000)	Conteo Mediano (1000 - 5000)	Conteo Alto (Mayor a 5000)	N° de Referencia en equipo de Coronografía
1	6:41	E-329	75	15	S	N/A	N/A	CIZ	Cadena de Aislación de vidrio	90	208	☑			CH01_07132017064135
2	6:42	E-329	75	15	S	CSD	N/A	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	90	975	☑			CH01_07132017064135
3	6:43	E-329	75	15	S	N/A	CID	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	90	557	☑			CH01_07132017064135
4	6:47	E-328	75	15	S	N/A	N/A	CIZ	Cadena de Aislación de vidrio	90	4109		☑		CH01_07132017064550
5	6:45	E-328	75	15	S	CSD	N/A	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	90	7243			☑	CH01_07132017064550
6	6:46	E-328	75	15	S	N/A	CID	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	90	5223			☑	CH01_07132017064550
7	6:45	E-316	84	9	A	N/A	N/A	CIZ-S	Cadena de Aislación de vidrio	70	835	☑			CH01_07132017064520
8	6:45	E-316	84	9	A	N/A	N/A	CIZ-L	Cadena de Aislación de vidrio	70	4597		☑		CH01_07132017064520
9	6:46	E-316	85	9	A	CSD-S	N/A	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	70	208	☑			CH01_07132017064520
10	6:46	E-316	85	9	A	CSD-L	N/A	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	70	208	☑			CH01_07132017064520
11	6:47	E-316	85	9	A	N/A	CID-S	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	70	139	☑			CH01_07132017064520
12	6:47	E-316	85	9	A	N/A	CID-L	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	70	3482		☑		CH01_07132017064520
13	6:49	E-317	72	17	S	N/A	N/A	CIZ	Cadena de Aislación de vidrio	70	2437		☑		CH01_07132017064937
14	6:50	E-317	72	17	S	CSD	N/A	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	70	3273		☑		CH01_07132017064937
15	6:51	E-317	72	17	S	N/A	CID	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	70	696	☑			CH01_07132017064937
16	6:59	E-318	72	17	S	N/A	N/A	CIZ	Cadena de Aislación de vidrio	70	1950		☑		CH01_07132017065831
17	7:00	E-318	72	17	S	CSD	N/A	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	70	2716		☑		CH01_07132017065831
18	7:01	E-318	72	17	S	N/A	CID	N/A	Cadena de Aislación de vidrio	70	8149			☑	CH01_07132017065831

EQUIPO DE EFECTO CORONA USADO

MARCA	*OFIL*	MODELO	*LUMINAR*	N° DE SERIE	*L13117033*

OBSERVACIONES

1.-Se realiza medicion de cadenas de aislación de L.220 kV. Condores-Parinacota en Estructuras N° 316, 317, 318, 328 y 329.

Nota abreviaturas: CIZ-L:Cadena inferior Izquierda Llegada; CIZ-S: Caderna inferior izquierda Salida; CIZ-P1: Cadena inferior izquierda puente suspensión 1.
CIZ: Cadena inferior Izquierda; CSD: Cadena Superior Derecha; CID: Cadena Inferior Derecha.

CONCLUSIONES

Se encuentran cadenas en conteo Alto, lo que indica según procedimiento equipo en fase critica.
Por lo cual se requiere realizar lavado/limpieza de aislación en un plazo menor a 30 dias.
Se sugiere realizar reemplazo de aislación en estructura N°328.

LISTADO DE PUNTOS CON OBSERVACIONES

Punto de Identificación N° 5,6,18.

FIRMA			
NOMBRE	*Marco Palmarola*	*Andrés Vásquez Acevedo*	*Gilberto Mendez*
CARGO	INSPECTOR	SUPERVISOR	APROBACION
FECHA	15.07.2016		

Figura 5.4: Ejemplo de un informe de coronografias, linea 1x220 Cóndores - Parinacota

5.5. Informe de reemplazo por aisladores siliconados

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	TORRE		Función	Contratista	Cadenas	Asiladores x Cadena	Total Aisladores	Status	Fecha de Trabajo
2	N°	TIPO							
3	1	22 A30.1 - 3	Anclaje	COBRA	6	17	102	REEMPLAZADO	11-may.-17
4	2	22 A1.1 ± 0	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	9-may.-17
5	3	22 A1.1 + 3	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	9-may.-17
6	4	22 A1.1 + 3	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	9-may.-17
7	5	22 A1.1 + 3	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	10-may.-17
8	6	22 A1.1 + 8	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	10-may.-17
9	7	22 A1.1 + 3	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	10-may.-17
10	8	22 A1.1 + 3	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	12-may.-17
11	9	22 A1.1 + 3	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	12-may.-17
12	10	22 A30.1 - 3	Anclaje	COBRA	6	17	102	REEMPLAZADO	15-may.-17
13	11	22 A30.1 ± 0	Anclaje	COBRA	6	17	102	REEMPLAZADO	13-may.-17
14	12	22 A1.1 ± 0	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	12-may.-17
15	13	22 A1.1 + 8	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	17-may.-17
16	14	22 A7.1 ± 0	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	17-may.-17
17	15	22 A1.1 ± 0	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	17-may.-17
18	16	22 A1.1 - 3	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	14-may.-17
19	17	22 A1.1 + 8	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	14-may.-17
20	18	22 A70.1 + 3	Anclaje	COBRA	10	17	170	REEMPLAZADO	14-may.-17
21	19	22 A1.1 + 3	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	Ejecución año 2018	
22	20	22 A1.1 - 3	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	Ejecución año 2018	
23	21	22 A30.1 - 3	Anclaje	BBOSCH			0	Ejecución año 2018	
24	22	22 A1.1 + 3	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	Ejecución año 2018	
25	23	22 A1.1 + 3	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	Ejecución año 2018	
26	24	22 A1.1 + 3	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	Ejecución año 2018	
27	25	22 A1.1 - 3	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	Ejecución año 2018	
28	26	22 A1.1 ± 0	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	Ejecución año 2018	
29	27	22 A7.1 ± 0	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	Ejecución año 2018	
30	28	22 A1.1 + 3	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	Ejecución año 2018	
31	29	22 A1.1 ± 0	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	Ejecución año 2018	
32	30	22 A1.1 + 3	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	Ejecución año 2018	
33	316	22 A30.1 - 3	Anclaje	COBRA	6	17	102	REEMPLAZADO	10-jun.-17
34	317	22 A1.1 ± 0	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	REEMPLAZADO	jun.-17
35	318	22 A1.1 + 3	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	PENDIENTE	FALTA INFORME
36	319	22 A30.1 + 3	Anclaje	COBRA	6	17	102	REEMPLAZADO	26-may.-17
37	320	22 A30.1 - 3	Anclaje	COBRA	6	17	102	REEMPLAZADO	25-may.-17
38	321	22 A7.1 ± 0	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	23-may.-17
39	322	22 A30.1 - 3	Anclaje	COBRA	6	17	102	REEMPLAZADO	24-may.-17
40	323	22 A7.1 + 3	Suspensión	COBRA	3	16	48	REEMPLAZADO	31-may.-17
41	324	22 A30.1 - 3	Anclaje	COBRA	6	17	102	REEMPLAZADO	28-may.-17
42	325	22 A30.1 + 3	Anclaje	COBRA	6	17	102	REEMPLAZADO	30-may.-17
43	326	22 A30.1 - 3	Anclaje	COBRA	6	17	102	REEMPLAZADO	27-may.-17
44	327	22 A30.1 + 3	Anclaje	BBOSCH	6	17	102	4 cadenas pendientes	Programado nov 2017
45	328	22 A1.1 + 8	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	REEMPLAZADO	Programado nov 2017
46	329	22 A1.1 + 3	Suspensión	BBOSCH	3	16	48	REEMPLAZADO	Programado nov 2017

Figura 5.5: Informe del estado del reemplazo de aisladores de vidrio por aisladores siliconados, linea 1x220 Cóndores - Parinacota

5.6. Macros Excel

1. **Enumeración de estructuras**

```
Private Sub Estructuras_Click()
Dim Current As Worksheet
Dim lista_celda As String
Dim num_mayor As Integer
Dim num_intermedio As Integer
Dim a As Integer
Dim ubicacion As String
Dim str As String
Dim N_estructuras As Integer

' Encontrar el numero de estructuras
' Inicializacion de variables auxiliares utilizadas mas adelante
num_intermedio = 0
num_mayor = 0
' Loop para recorrer las hojas
For Each Current In Worksheets
' Solo recorrer las hojas siguientes en el excel, que son donde estan los datos de mantenimiento por ano

If Current.Index > Sheets("Estructuras").Index Then
' Seleccionar celda *primera línea de datos* que corresponde a D2 en todas las hojas con datos
Application.Goto ActiveWorkbook.Sheets(Current.Index).Cells(2, 4)
' Configurar el bucle Do para que se detenga al llegar a una celda vacía.

Do Until IsEmpty(ActiveCell)
lista_celda = ActiveCell
j = Len(lista_celda)
' Recorrer la celda y comparar cada numero para ver cual es mayor

For i = 0 To ((j + 1) / 4) - 1
a = 1 + 4 * i
num_intermedio = CInt(Mid(lista_celda, a, 3))

If num_intermedio > num_mayor Then
num_mayor = num_intermedio
End If
Next
' Bajar 1 fila de la ubicación actual.
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
End If
Next
' Tabular estructuras
N_estructuras = num_mayor
```

```
Application.Goto ActiveWorkbook.Sheets(”Estructuras”).Cells(2, 3)
Selection.EntireColumn.NumberFormat = ”@”
’ Configurar el bucle Do
i = 1

Do Until i = N_estructuras + 1

If i < 10 Then
Selection.Value = "00"& i

ElseIf i < 100 Then
Selection.Value = ”0” & i

Else
str = i
Selection.Value = str
End If
i = i + 1
’ Bajar 1 fila de la ubicación actual.
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
Range(”C2”).Select
ActiveCell.Offset(-1, 0).Value = ”Estructura”
End Sub
```

2. **Tabulacion de tiempos y cantidad de lavados**

```
Private Sub Tiempos()

Dim nombre As String
Dim cadena As String
Dim posicion As Integer
Dim suma_test As Date
Dim suma_tcad As Date
Dim total_mant As Integer
Dim fil As Integer
Dim col As Integer

’ Formato de datos columnas
Range(”D:E”).Select
Range(”G1”).Activate
Selection.NumberFormat = ”[$-x-systime]h:mm:ss am/pm”
Columns("F:F").Select
Selection.NumberFormat = ”0”
```

```
' Seleccionar celda *primera línea de datos*
Range("C2").Select
' Configurar el bucle Do para que se detenga al llegar a una celda vacía.
Do Until IsEmpty(ActiveCell)
nombre = ActiveCell
fil = ActiveCell.row
col = ActiveCell.column
' Inicializar variables
suma_test = 0
suma_tcad = 0
total_mant = 0

For Each Current In Worksheets
' Solo recorrer las hojas siguientes en el excel, que son donde estan los datos de mantenimiento por ano

If Current.Index > Sheets("Estructuras").Index Then
' Seleccionar celda *primera línea de datos* de tiempo por estructura
Application.Goto ActiveWorkbook.Sheets(Current.Index).Cells(2, 4)
' Configurar el bucle Do para que se detenga al llegar a una celda vacía.

Do Until IsEmpty(ActiveCell)
cadena = ActiveCell
posicion = InStr(cadena, nombre)

If posicion > 0 Then
suma_test = suma_test + ActiveCell.Offset(0, 4)
suma_tcad = suma_tcad + ActiveCell.Offset(0, 5)
total_mant = total_mant + 1
End If
' Bajar 1 fila de la ubicación actual.
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
End If
Next
Application.Goto ActiveWorkbook.Sheets("Estructuras").Cells(fil, col)
ActiveCell.Offset(0, 1) = suma_test
ActiveCell.Offset(0, 2) = suma_tcad
ActiveCell.Offset(0, 3) = total_mant
' Bajar 1 fila de la ubicación actual.
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
' Titulos lista
Range("D1:F1").Select
Selection.NumberFormat = "@"
Sheets("Estructuras").Range("D1") = "Suma txEstructura"
Sheets("Estructuras").Range("E1") = "Suma txCadena"
```

```
Sheets("Estructuras").Range("F1") = "Total lavados"

End Sub
```

3. **Tabulacion de tiempos unitarios de lavado**

```
Private Sub Unitarios_Click()

Columns("G:H").Select
Selection.NumberFormat = "[$-x-systime]h:mm:ss am/pm"
' Seleccionar celda *primera línea de datos*
Range("C2").Select
' Configurar el bucle Do para que se detenga al llegar a una celda vacía.

Do Until IsEmpty(ActiveCell)
ActiveCell.Offset(0, 4) = ActiveCell.Offset(0, 1) / ActiveCell.Offset(0, 3)
ActiveCell.Offset(0, 5) = ActiveCell.Offset(0, 2) / ActiveCell.Offset(0, 3)
' Bajar 1 fila de la ubicación actual.
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
' Titulos columna
Range("G1:H1").Select
Selection.NumberFormat = "@"
Sheets("Estructuras").Range("G1") = "txEstructura"
Sheets("Estructuras").Range("H1") = "txCadena"

End Sub
```

5.7. Tablas de evaluación de datos

	Component decisions				System decisions		
Data required	Component life distribution	Age/block replacement	Inspection interval calculation	Condition-based maintenance	Capital spares	Reliabity growth	Life cycle costing
Asset identifier	•	•	•	•	•	•	•
Failure mode	•	•	•	•	•	•	
Suspension indication	•	•	•	•			
Start date	•	•	•	•	•	•	•
Utilisation time at start	•	•	•	•	•	•	•
Event date	•	•	•	•	•	•	•
Utilisation time at event	•	•	•	•	•	•	•
Cost of preventative replacement		•	•	•			•
Cost of failure replacement		•	•	•	○		•
Downtime due to preventative replacement		•	•	•			•
Downtime due to failure replacement		•	•	•			•
Repair/inspection event date/time			•	•	○		
CM inspection name and value				•			

Figura 5.6: Evaluación de datos para diferentes modelos aplicables de gestión de activos (por Montgomery, Hodkiewicz y Jardine)

5.8. Cotización aisladores de vidrio templado

Almirante Pastene Nº 333 Of.501
Providencia - Santiago - Chile
Fono: +56 2 2264 7700
Fax: +56 2 2236 4782
info@rtho.com

Santiago, 12 de Septiembre de 2018
REF.: AISLADORES DE VIDRIO.
OFERTA Nº 2018367-0

Señores:
Universidad Técnica Federico Santa María
Avda. Vicuña Mackenna 3939
San Joaquín.

At: Srta.(ra) Romina González P.
Apoyo Académico

De nuestra consideración:

En atención a lo solicitado, tenemos a bien someter a vuestra consideración, nuestra oferta por *Aisladores de vidrio,* fabricados en Ucrania por nuestra representada **LVIV Insulators (Ucrania),** por lo siguiente, a saber:

ITEM	QTY	DESCRIPCION / REFERENCIA	PRECIO UNITARIO
1	15	Aislador de Disco en Suspensión de Vidrio templado Tipo **FOG**, con manguito de Zinc. Coupling : **B&S IEC 160/20mm.** M&E Strength : **160 kN** Spacing : **146mm.** Diameter : **320mm.** Creepage distance : **545mm.** **REF: U160BSP+ZS**	**USD 36,00**

TOTAL NETO OFERTA 2018367-0
USD 540,00.- ➔ DDP - SANTIAGO

Figura 5.7: Cotización aisladores de vidrio templado