

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA**

**PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN
GASEODUCTO.**

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Ingeniero de Ejecución en
CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno: Rodrigo Andrés Araya Valencia

Profesor Guía: Franz Yurjevic Perin

2025

RESUMEN

KEYWORDS: AUTOMATIZACIÓN, PROTECCIÓN CATÓDICA, ENERGÍA SOLAR.

El presente proyecto tiene como objetivo principal el desarrollar una propuesta técnica e integral para la automatización de la protección catódica a un gaseoducto en específico, el cual debe ser protegido contra la corrosión a través de técnicas de protección catódica, lo que se explica, a grandes rasgos, convirtiendo el metal a proteger en el cátodo de una celda electroquímica. Esto se logra suministrando electrones al metal, lo que inhibe la reacción de oxidación que causa la corrosión. Bajo ese precedente, se describirán dos alternativas tradicionales para luego dar paso a una tercera alternativa que es la solución que describe este proyecto. Con ello se espera lograr resolver la problemática actual del gaseoducto que en mediano a largo plazo puede convertirse en un problema mayor, como roturas de la tubería y fugas de gas.

Con posterioridad se describirán los componentes necesarios y el funcionamiento de la solución escogida, la automatización de inyección de corriente de protección catódica al gaseoducto, energizado con energía fotovoltaica para su funcionamiento autónomo.

Este nuevo sistema tiene como objetivo principal proteger de forma automatizada y autónoma el gaseoducto de la corrosión y con ello reducir los costos de mantenimiento comparados con las otras alternativas de protección.

Se realizará finalmente, una evaluación económica de los costos de mantenimiento para el gaseoducto en cuestión, en comparativa con los costos actuales de otros sistemas de protección catódica aplicados en la empresa para gaseoductos similares. Si bien, actualmente los costos de mantenimiento para la empresa no son un problema, la reducción de gastos de mantenimiento al aplicar este nuevo sistema de protección catódica puede contribuir a realizar más inversiones a otros gaseoductos a futuro.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 1: PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS..... | 2 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.1 ANTECEDENTES GENERALES..... | 3 |
| 1.1.1 Descubrimiento de la protección catódica..... | 3 |
| 1.1.2 Evolución de los sistemas de protección catódica..... | 3 |
| 1.1.3 Importancia de la protección catódica en la industria del gas natural | 4 |
| 1.1.4 Normativa y estándares internacionales | 5 |
| 1.2 MARCO TEÓRICO..... | 5 |
| 1.2.1 Conceptos básicos de la corrosión y protección catódica | 5 |
| 1.2.2 Tipos de corrosión | 5 |
| 1.2.3 Mecanismos de protección catódica | 6 |
| 1.2.4 ¿Cómo se lleva a cabo la protección catódica? | 6 |
| 1.2.5 Sistemas tradicionales de protección catódica | 6 |
| 1.2.6 Sistemas modernos de protección catódica..... | 7 |
| 1.3 DESCRIPCIÓN DEL GASEODUCTO..... | 8 |
| 1.3.1 Ubicación geográfica..... | 8 |
| 1.3.2 Material de construcción, diámetro y longitud. | 9 |
| 1.3.3 Condiciones del suelo. | 9 |
| 1.3.4 Sistema de protección catódica actual | 10 |
| 1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN DEL NUEVO SISTEMA | 10 |
| 1.4.1 Análisis de la corrosión en el gaseoducto. | 11 |
| 1.4.2 Identificación de las zonas más vulnerables. | 11 |
| 1.4.3 Razones para elegir la ubicación propuesta. | 11 |
| 1.4.4 Cumplimiento de normativas ambientales. | 12 |
| 1.5 PROBLEMÁTICA | 12 |
| 1.5.1 Descripción del problema. | 12 |
| 1.5.2 Importancia de resolverlo. | 13 |
| 1.5.3 Involucrados..... | 13 |
| 1.6 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN | 14 |
| 1.6.1 Alternativa N°1: Ánodos de sacrificio: | 14 |
| 1.6.2 Alternativa N°2: Rectificador de corriente impresa:..... | 14 |
| 1.6.3 Alternativa N°3: Sistema automatizado de inyección de corriente de protección catódica..... | 14 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 1.6.4 | Tabla de puntuación de alternativas de solución | 14 |
| 1.7 | PROPOSICIÓN DE SOLUCIÓN DEL PROBLEMA | 15 |
| 1.7.1 | Funcionamiento de la solución propuesta. | 15 |
| 1.7.2 | Ventajas y consideraciones adicionales. | 16 |
| 1.8 | REQUERIMIENTOS | 17 |
| 1.8.1 | Requerimientos técnicos del sistema. | 17 |
| 1.8.2 | Requisitos legales y normativos | 18 |
| 1.9 | OBJETIVOS..... | 19 |
| 1.9.1 | Objetivo general | 19 |
| 1.9.2 | Objetivos específicos | 19 |
| CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA AUTOMATIZADO. | | 20 |
| 2.1 | SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES | 21 |
| 2.1.1 | Panel solar..... | 21 |
| 2.1.2 | Selección y justificación de la batería | 22 |
| 2.1.3 | Controlador de carga | 24 |
| 2.1.4 | Controlador lógico programable, PLC Siemens Logo 24 | 26 |
| 2.1.5 | Selección y justificación del MOSFET para la inyección de corriente de protección catódica..... | 27 |
| 2.1.6 | Selección de la celda de referencia de cobre – sulfato de cobre..... | 28 |
| 2.1.7 | Selección del ánodo para el sistema automatizado..... | 30 |
| 2.2 | CÁLCULOS REFERENTES A CONSUMOS Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA..... | 31 |
| 2.3 | INFRAESTRUCTURA NECESARIA PARA IMPLEMENTAR EL PROYECTO DE PROTECCIÓN CATÓDICA | 32 |
| 2.3.1 | Importancia de la infraestructura. | 32 |
| 2.3.2 | Elementos clave de la infraestructura. | 33 |
| 2.4 | PROGRAMACIÓN DEL PLC SIEMENS LOGO 24 PARA CONTROL PI DEL POTENCIAL EN PROTECCIÓN CATÓDICA..... | 35 |
| 2.4.1 | Objetivos del control PI | 35 |
| 2.4.2 | Diagrama de bloques del sistema. | 35 |
| 2.4.3 | Variables y señales..... | 36 |
| 2.4.4 | Estructura del programa..... | 36 |
| 2.4.5 | Simulación del comportamiento de la señal..... | 38 |
| 2.4.6 | Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema | 39 |
| CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA..... | | 41 |
| 3. | INTRODUCCIÓN | 41 |
| 3.1. | DETERMINACIÓN DE LA MANO DE OBRA | 41 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1.1 | HORAS DE MANO DE OBRA | 41 |
| 3.2 | VALOR POR HORA..... | 43 |
| 3.3 | COSTO DE INSTALACIÓN Y MATERIALES. | 44 |
| 3.3.1 | Costo de instalación. | 44 |
| 3.3.2 | Costos de materiales. | 45 |
| 3.4 | BENEFICIOS. | 47 |
| 3.4.1 | Reducción de costos operativos..... | 47 |
| 3.5 | INGRESOS Y EGRESOS | 49 |
| 3.5.1 | Ingresos esperados (Ahorros). | 49 |
| 3.5.2 | Egresos. | 50 |
| 3.5.3 | Flujos de caja..... | 51 |
| 3.6 | CARTA GANTT..... | 55 |
| | CONCLUSIONES..... | 56 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 58 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1-1. Red con fallas en el revestimiento..... | 4 |
| Figura 1-2. Sistema tradicional de protección catódica, ánodos de sacrificio..... | 7 |
| Figura 1-3. Sistema de protección catódica, corriente impresa a través de rectificador..... | 8 |
| Figura 1-4. Ubicación geográfica de la red del gaseoducto..... | 9 |
| Figura 1-5. Condiciones del suelo..... | 10 |
| Figura 1-6. Ubicación del punto escogido..... | 11 |
| Figura 2-1. Panel solar escogido..... | 22 |
| Figura 2-2. Batería escogida..... | 24 |
| Figura 2-3. Controlador de carga escogido..... | 25 |
| Figura 2-4. PLC escogido..... | 26 |
| Figura 2-5. Módulo MOSFET escogido..... | 27 |
| Figura 2-6. Celda de referencia CSE..... | 29 |
| Figura 2-7. Ánodo de grafito impregnado..... | 30 |
| Figura 2-8. Datos explorador solar..... | 31 |
| Figura 2-9. Gabinete escogido..... | 33 |
| Figura 2-10. Diagrama de programación..... | 38 |
| Figura 2-11. Gráficas simuladas..... | 38 |
| Figura 2-12. Diagrama de flujo..... | 39 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1-1. Valores de puntuación..... | 15 |
| Tabla 1-2. Puntuación de alternativas | 15 |
| Tabla 3-1. Costos de instalación..... | 45 |
| Tabla 3-2 Costos de materiales general..... | 45 |
| Tabla 3-3 Costos de materiales en detalle..... | 46 |
| Tabla 3-3 Comparación de valores por alternativas de protección catódica..... | 48 |
| Tabla 3-4 Gráfica de comparación económica..... | 49 |
| Tabla 3-5 Estimación económica del proyecto en un caso favorable..... | 51 |
| Tabla 3-6 Estimación económica del proyecto en un caso neutro..... | 52 |
| Tabla 3-7 Estimación económica del proyecto en un caso desfavorable..... | 53 |
| Tabla 3-8 Carta Gantt..... | 55 |

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLA

| | |
|---------|--|
| NACE: | National Association of Corrosion Engineers |
| PLC: | Programmable Logic Controller (Controlador lógico programable) |
| VAN: | Valor actual neto |
| TIR: | Tasa interna de retorno |
| TMAR: | Tasa mínima aceptable de retorno |
| MOSFET: | Transistor de efecto de campo |
| UF: | Unidad de fomento |
| CLP: | Código moneda oficial de Chile |
| USD: | Código moneda oficial Estados Unidos |
| API: | Instituto americano del petróleo |
| ISO: | Organización internacional de normalización |
| CSE: | Electrodo de sulfato de cobre |

B. SIMBOLOGÍA

| | |
|------|---------------------|
| A: | Amperios |
| V: | Voltios |
| mm: | Milímetros |
| mV: | Milivoltios |
| kWh: | Kilo Watts por hora |
| m: | metro |
| km: | Kilo metro |

INTRODUCCIÓN

La corrosión de las infraestructuras metálicas enterradas, como los gaseoductos u oleoductos, representan una amenaza constante para la seguridad operativa y la continuidad de los servicios de suministro de gas natural. Esta problemática se agudiza en entornos con suelos agresivos, como aquellos cercanos a cursos de agua o con alta concentración de sales, o también los suelos sumamente resistivos, donde los procesos corrosivos se aceleran significativamente o en su defecto no permiten un buen control aplicando protección catódica.

La protección catódica es una técnica ampliamente reconocida y utilizada para mitigar los efectos de la corrosión en estructuras metálicas enterradas. Sin embargo, los sistemas tradicionales basados en ánodos de sacrificio presentan limitaciones inherentes, como la necesidad de un mantenimiento frecuente, la dificultad de adaptar la protección a las condiciones variables del suelo y la imposibilidad de monitorear de forma remota el estado del sistema.

En este contexto, el presente proyecto propone una solución innovadora y sostenible para optimizar la protección catódica de un gaseoducto, mediante la implementación de un sistema automatizado y alimentado con energía solar. Esta propuesta busca superar limitaciones de los sistemas convencionales y garantizar una protección más eficiente y duradera de la infraestructura.

El gaseoducto objeto de este trabajo se encuentra ubicado en una zona geográfica caracterizada por una alta variabilidad en las condiciones del suelo, incluyendo la presencia de un humedal en un tramo específico. Esta condición especial plantea desafíos adicionales para la protección catódica, ya que las regulaciones ambientales restringen la realización de trabajos en zonas protegidas.

Ante este escenario, se proponen la instalación de un sistema de protección catódica automatizado a una distancia prudencial del humedal, lo que permitirá garantizar la protección de la tubería sin infringir las normativas ambientales. Además, la utilización de energía solar como fuente de alimentación permitirá reducir la dependencia de la red eléctrica y disminuir los costos de operación a largo plazo.

CAPÍTULO 1: PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas inherentes que presenta la corrosión en tuberías de acero que transportan, en este caso, gas natural, es la rotura de la red por pérdida del material proveniente de la corrosión, ante una mala protección catódica o inexistente, además de daños por terceros que puede tener el gaseoducto para lo cual la necesidad de un aumento de corriente de protección catódica para proteger aquel punto expuesto al electrolito.

El objetivo claro y conciso es proteger la tubería de acero de la red de gas natural que transporta este fluido a alta presión, con una corriente automatizada de protección catódica, teniendo como único generador energía fotovoltaica.

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

La protección catódica ha evolucionado de una práctica empírica a una tecnología sofisticada y esencial para la protección de infraestructuras metálicas en diversas industrias, especialmente en la industria del gas natural. La normativa y los estándares internacionales garantizan que los sistemas de protección catódica se diseñen, instalen y mantengan de acuerdo con las mejores prácticas.

1.1.1 Descubrimiento de la protección catódica

Las primeras observaciones sobre la protección de metales se remontan a siglos atrás, cuando se notó que ciertos metales, al entrar en contacto con otros, podían reducir la corrosión. Sin embargo, fue en el siglo XIX con los avances de la electroquímica que se comenzaron a realizar los primeros estudios sistemáticos sobre la corrosión y la protección de metales. Científicos como Michael Faraday realizaron experimentos fundamentales que sentaron las bases para entender los procesos electroquímicos involucrados en la corrosión.

A principios del siglo XX, se consolidó la teoría de la corrosión electroquímica, lo que permitió comprender en detalle los mecanismos por los cuales los metales se corroen y, por ende, desarrollar métodos para controlarla. La segunda guerra mundial aceleró significativamente el desarrollo y la aplicación de la protección catódica, debido a la necesidad de proteger grandes infraestructuras metálicas como buques y oleoductos.

1.1.2 Evolución de los sistemas de protección catódica

Los sistemas de protección catódica han evolucionado significativamente desde sus inicios donde se utilizaban principalmente ánodos de sacrificio, como el zinc o el magnesio, que se conectaban al metal a proteger. Con el tiempo, se desarrollaron sistemas de corriente impresa,

donde se aplica una corriente eléctrica externa al metal a proteger a través de un rectificador y un ánodo inerte. Además, se han perfeccionado los materiales de los ánodos los sistemas de monitoreo de control y se han desarrollado modelos matemáticos para optimizar el diseño y la operación de los sistemas de protección catódica.

1.1.3 Importancia de la protección catódica en la industria del gas natural

La industria del gas natural depende en gran medida de la protección catódica para garantizar la integridad y seguridad de sus infraestructuras, una de las formas más comunes en donde puede producirse corrosión, son por fallas en el revestimiento (ver figura 1-1). Las tuberías de gas, tanto las que transportan gas natural a gran escala como la red de distribución local, están expuestas a distribuciones ambientales agresivas que pueden acelerar la corrosión. La protección catódica es esencialmente para:

Prevenir fugas: La corrosión puede causar perforaciones en las tuberías, lo que puede provocar fugas de gas, con grandes consecuencias para la seguridad y el medio ambiente.

Aumentar la vida útil de las instalaciones: Al proteger las tuberías de la corrosión, se aumenta significativamente su vida útil, lo que traduce en menores costos de mantenimiento y reemplazo.

Cumplir con las normativas: La mayoría de los países tienen regulaciones estrictas en cuanto a la protección catódica de las tuberías de gas, con el fin de garantizar la seguridad pública.



Fuente: Imágenes tomadas en terreno, marzo 2024

Figura 1-1. Red con fallas en el revestimiento

1.1.4 Normativa y estándares internacionales

Existen numerosas normas y estándares internacionales que regulen el diseño, instalación y mantenimiento de los sistemas de protección catódica. Algunos de los más importantes incluyen:

NACE International: Esta organización es líder mundial en el desarrollo de estándares y tecnologías para el control de la corrosión. Publica una amplia gama de estándares relacionados a la protección catódica.

API: La API desarrolla estándares para la industria petrolera y del gas natural, incluyendo normas específicas para la protección catódica de tuberías y tanques de almacenamiento.

ISO: La ISO publica normas internacionales para diversos sectores incluyendo la protección catódica.

1.2 **MARCO TEÓRICO**

La protección catódica es una técnica esencial para proteger estructuras metálicas de la corrosión. Al comprender los principios básicos de la corrosión y los diferentes métodos de protección catódica, se pueden seleccionar y diseñar sistemas de protección adecuados para cada aplicación.

1.2.1 Conceptos básicos de la corrosión y protección catódica

La corrosión es un proceso electroquímico natural por el cual los metales tienden a volver a su estado más estable, generalmente un óxido. Esencialmente, es un deterioro de un material a causa de un ataque químico por su entorno. La protección catódica es una técnica que consiste en convertir el metal a proteger en el cátodo de una celda electroquímica, inhibiendo así la reacción de oxidación y, por lo tanto, la corrosión.

1.2.2 Tipos de corrosión

- Corrosión uniforme: Afecta a toda la superficie del metal de manera homogénea.
- Corrosión localizada: Ataca zonas específicas del metal, como picaduras, grietas o roturas.
- Corrosión galvánica: Ocurre cuando dos metales diferentes se encuentran en contacto en un electrolito (como el agua del mar).
- Corrosión por picaduras: Forma pequeñas cavidades en la superficie del metal.
- Corrosión intergranular: afecta los límites de grano del metal.
- Corrosión por estrés: Se acelera por la presencia de tensiones mecánicas.

1.2.3 Mecanismos de protección catódica

Por un lado, se encuentra la polarización catódica al aplicar una corriente externa o utilizando un metal más activo, se desplaza el potencial del metal hacia valores más negativos, dificultando la reacción de oxidación.

También, se pueden formar películas protectoras en algunos casos, donde puede favorecer esta formación de una película pasiva sobre el metal, que actúa como una barrera física contra la corrosión.

1.2.4 ¿Cómo se lleva a cabo la protección catódica?

El proceso electroquímico que se produce entre el cátodo (metal a proteger), el ánodo (metal más electronegativo o activo), el electrolito (para este caso el terreno por donde está la tubería enterrada) y el paso metálico (el cable que une a la tubería y el ánodo). Se basa en hacer circular los electrones del metal más electronegativo (ánodo de magnesio) hacia la tubería a proteger (cátodo) a través del electrolito, y que este circule a través del cable que los une, para cerrar el circuito.

Para corrientes impresas es muy similar el proceso, en donde la forma de proteger un metal es forzando a que sus electrones circulen en la dirección correcta (desde el ánodo a través del electrolito e ingresando a la tubería, para cerrar el circuito por el paso metálico que permite el cable que los une).

El metal sufrirá la corrosión (pérdida del material) cuando sus electrones abandonen su estructura, es por ello por lo que el ánodo es el metal elegido para sufrir esta corrosión en vez que el metal destinado a protegerse.

1.2.5 Sistemas tradicionales de protección catódica

Comúnmente y desde hace más tiempo, se suelen ocupar ánodos de sacrificio, los cuales se conectan eléctricamente al metal a proteger (ver figura 1-2). Al ser más reactivos, se corroen en lugar del metal protegido. Metales como el zinc, el magnesio y el aluminio se utilizan comúnmente como ánodos de sacrificio.



Fuente: Imágenes tomadas en terreno, marzo 2024

Figura 1-2. Sistema tradicional de protección catódica, ánodos de sacrificio.

1.2.6 Sistemas modernos de protección catódica

Hoy en día, también se suelen ocupar para circunstancias específicas, como suelos altamente resistivos y en donde la necesidad de corriente de protección catódica es mucho más alta, se aplica corriente eléctrica externa al metal a proteger a través de un rectificador y un ánodo inerte (como grafito o el platino). Este sistema permite un control más preciso del potencial y una mayor flexibilidad en el diseño (ver figura 1-3).



Fuente: Imágenes tomadas en terreno, marzo 2024

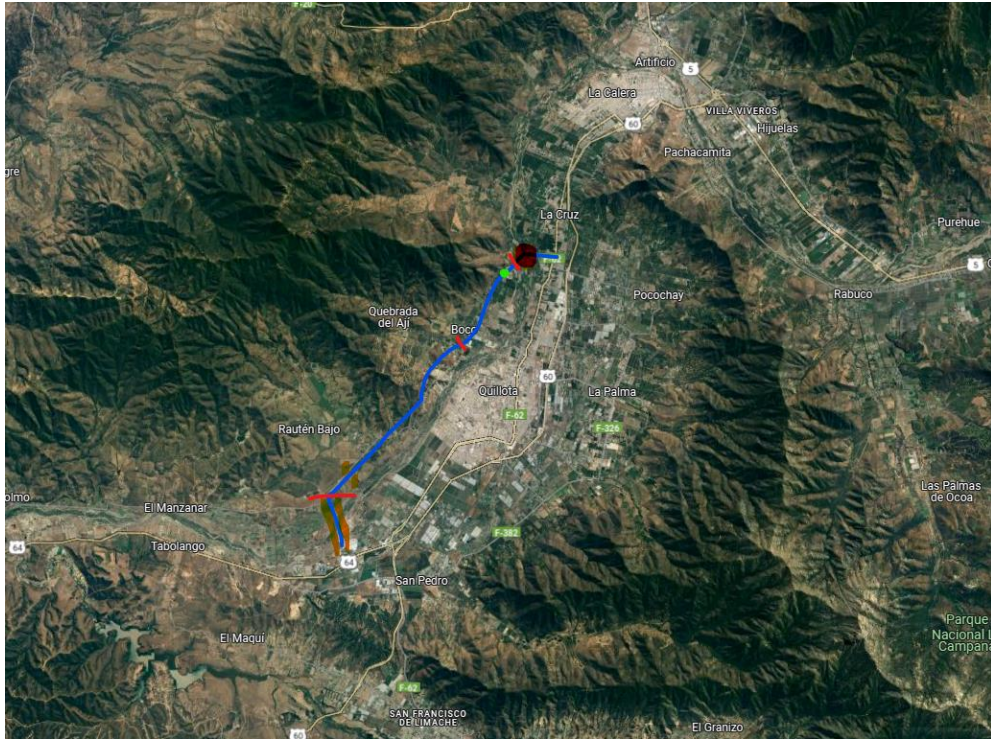
Figura 1-3. Sistema de protección catódica, corriente impresa a través de rectificador.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL GASEODUCTO

Para el proyecto se destinó un tramo del gaseoducto de la empresa Gasvalpo, que tiene nuevas y diversas problemáticas a tratar.

1.3.1 Ubicación geográfica

El gaseoducto objeto de este estudio se encuentra ubicado en la región de Valparaíso, Chile, desde la localidad de Carolmo hasta la localidad de La Cruz (ver figura 1-4). Esta zona se caracteriza por su clima variado, en donde en periodos del año esta con lluvias y aumento considerable del río Aconcagua, y otras ocasiones con días de mucho calor. La presencia del río presenta desafíos adicionales debido a las variaciones en el potencial del suelo, la erosión, la dificultad de acceso y los costos asociados.



Fuente: Google maps, imágenes TerraMétrica, Datos del mapa 2024

Figura 1-4. Ubicación geográfica de la red del gaseoducto.

1.3.2 Material de construcción, diámetro y longitud.

El gaseoducto es de acero API 5L, sin costura con un recubrimiento de tricapa, para la protección y aislación del terreno en el cual estará enterrado. La tubería está separada en tres porciones en donde está aislado eléctricamente entre tramos a través de juntas dieléctricas, y con un total de 110 vértices o uniones. Tiene un promedio de profundidad de 1,2[m].

La tubería posee un espesor de 11,1[mm], y una longitud total de 7.423[m]. Y su puesta en servicio comenzó 24 de junio del año 1999.

1.3.3 Condiciones del suelo.

El gaseoducto atraviesa suelos bastante húmedos debido a su proximidad al río Aconcagua, no obstante, las recientes crecidas del caudal en épocas invernales, genera una drástica variación de la resistividad del suelo, además la particularidad que la mayor parte del territorio por el cual pasa la red posee mucha piedra y rocas (ver figura 1-5), lo cual también genera un aumento en la resistividad del terreno.



Fuente: Imágenes tomadas en terreno, marzo 2024

Figura 1-5. Condiciones del suelo.

1.3.4 Sistema de protección catódica actual

El sistema de protección catódica utilizado en la actualidad para esta red es mediante ánodos de sacrificio de magnesio, distribuidos a lo largo del gaseoducto, aproximadamente cada 1 kilómetro. En la data acumulada de las mediciones de sus potenciales de protección catódica se ha visto una baja en su eficiencia y una variación en los resultados medidos, se han instalado algunas camadas de ánodos en los puntos más críticos lo cual ha corregido momentáneamente esas bajas de potencial de protección catódica.

El gaseoducto en algunos tramos posee interferencia eléctrica con otros sistemas de protección catódica de otras tuberías y también un cruce con torres de alta tensión, lo cual genera perturbaciones en variaciones en el potencial de protección catódica de la red de estudio.

La parte final del tramo del gaseoducto atraviesa el río en una zona que hace poco tiempo fue catalogada como humedal, lo que implica que no se pueden realizar trabajos de mantenimiento periódicos.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN DEL NUEVO SISTEMA

A lo largo de los casi 8 Km de la tubería, la zona destinada es de resguardada día y noche por ser una planta de compresión, elemental para el suministro de gas a diversos clientes aguas abajo.

1.4.1 Análisis de la corrosión en el gaseoducto.

Se ha identificado que el tramo del gaseoducto cercano al humedal presenta un mayor riesgo de corrosión debido a la erosión causada por el río y las piedras arrastradas durante eventos climáticos.

El historial de mantenimiento revela que en esta zona se han registrado pérdidas de revestimiento y signos de corrosión superficial, lo que evidencia la necesidad de una protección adicional.

1.4.2 Identificación de las zonas más vulnerables.

La cercanía al humedal expone al gaseoducto a condiciones de suelo más agresivas, con mayor humedad y presencia de sales, acelerando los procesos de corrosión.

Las fluctuaciones del nivel del río y la erosión causada por las corrientes generan inestabilidad en el terreno y pueden dañar el revestimiento de la tubería.

1.4.3 Razones para elegir la ubicación propuesta.

La empresa cuenta con un terreno propio en las inmediaciones del tramo crítico, lo que facilita la instalación y mantenimiento del sistema (ver figura 1-6).

La presencia de un punto de control existente en la zona permite conectar fácilmente el nuevo sistema de protección catódica.

La ubicación propuesta se encuentra alejada de vías públicas y de equipos que puedan representar un peligro, garantizando la seguridad de las operaciones.

La zona ofrece las condiciones ambientales adecuadas para la instalación de paneles solares, con suficiente espacio aéreo y una exposición solar óptima.



Fuente: Google maps, Imágenes Airbus, CNES. Datos del mapa 2024

Figura 1-6. Ubicación del punto escogido.

1.4.4 Cumplimiento de normativas ambientales.

La ubicación seleccionada cumple con las normativas ambientales al mantener una distancia segura del humedal, evitando así cualquier impacto negativo en el ecosistema.

La implementación del sistema de protección catódica ayudará a prevenir la contaminación del suelo y del agua subterránea en caso de fugas contribuyendo a la protección del medio ambiente.

Dada la tecnología adoptada como lo es la energía solar, se reduce la huella de carbono que puede generar la instalación a través de maquinaria de más ánodos de sacrificio o de la implementación de corriente impresa proveniente de la red eléctrica.

1.5 **PROBLEMÁTICA**

La corrosión en el gaseoducto representa una amenaza significativa para la seguridad operativa y la continuidad del suministro de gas natural. La combinación de factores geográficos, ambientales y operativos exacerba los problemas de corrosión, generando un riesgo elevado de fallas en la infraestructura.

1.5.1 Descripción del problema.

El gaseoducto enfrenta una serie de desafíos específicos que aceleran los procesos de corrosión.

La cercanía al río Aconcagua expone la tubería a la humedad constante, variaciones en el nivel del agua y la erosión del suelo, lo que debilita el revestimiento y facilita la penetración de agentes corrosivos.

La presencia de un humedal restringe el acceso para inspecciones y reparaciones, dificultando la detección temprana de problemas de corrosión y aumentando el riesgo de fallas catastróficas.

El cruce con líneas de alta tensión y otras redes de acero con sistemas de protección catódica generan corrientes parásitas que pueden interferir con la protección del gaseoducto y acelerar la corrosión.

La presencia de rocas y piedras en el suelo aumenta la resistividad, dificulta la distribución uniforme de la corriente de protección catódica y reduciendo su eficacia.

La alta presión del gas natural dentro de la tubería (superior a 40 bar), aumenta el riesgo asociado a una falla, ya que una pequeña fisura puede provocar una liberación rápida de gas con consecuencias graves.

La imposibilidad de realizar mantenimiento preventivos o correctivos en zonas de difícil

acceso, como el humedal y áreas agrícolas, incrementan la probabilidad de que la corrosión evolucione sin ser detectada.

1.5.2 Importancia de resolverlo.

Resolver la problemática de la corrosión en el gaseoducto es crucial por las siguientes razones:

- Seguridad: La falla de una tubería de gas puede provocar incendios, explosiones y la liberación de gases tóxicos, poniendo en riesgo la vida de las personas y el medio ambiente.
- Continuidad del suministro: Las interrupciones en el suministro de gas natural pueden causar graves perjuicios económicos y sociales, afectando a industrias, hogares y servicios públicos.
- Cumplimiento normativo: La corrosión no controlada infringe las normas de seguridad y ambientales, exponiendo a la empresa a sanciones y multas.
- Protección de inversiones: La corrosión reduce la vida útil de la infraestructura, generando mayores costos de mantenimiento y reemplazo.

1.5.3 Involucrados.

Los principales involucrados en esta problemática son:

- Empresa de gas natural: Responsable de la operación y mantenimiento del gaseoducto, así como de garantizar la seguridad del suministro.
- ENEL: Propietaria de las líneas de alta tensión que cruzan el gaseoducto y responsable de gestionar las interferencias electromagnéticas.
- Electrogas: Empresa que posee redes de acero paralelas o que se cruzan con el gaseoducto, generando interferencias en los sistemas de protección catódica.
- Colbún: Empresa con una planta cercana al inicio del gaseoducto, cuyas actividades pueden influir en las condiciones del suelo y la corrosión.
- Propietarios de terrenos agrícolas: Afectados por las posibles consecuencias de una falla en el gaseoducto y con intereses en la protección del medio ambiente.
- Comunidades locales: Habitantes de las localidades cercanas al gaseoducto, quienes pueden verse afectados por una emergencia causada por una falla en la tubería.
- Autoridades reguladoras: Organismos gubernamentales responsables de supervisar la seguridad de las infraestructuras críticas y garantizar el cumplimiento de las normativas ambientales.

1.6 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

En la industria existen dos grandes métodos para controlar la corrosión de una red de acero enterrada, las cuales se presentarán a continuación.

1.6.1 Alternativa N°1: Ánodos de sacrificio:

Esta alternativa propone continuar con la forma actual de protección catódica ante la corrosión, que es más focalizada en una zona y con altos costos de mantenimiento, además de ante una alta demanda de corriente de protección catódica, se necesitaran instalar innumerables ánodos de sacrificio en la red de acero, se deberá tener en cuenta, además, que existen zonas donde no se podrán instalar por normas medioambientales.

1.6.2 Alternativa N°2: Rectificador de corriente impresa:

Con esta alternativa, se daría solución a una posible alta demanda de corriente de protección catódica, puesto que un rectificador de corriente impresa adquiere energía desde la red eléctrica trifásica y la transforma en corriente continua de protección catódica según sea necesario, a través de un transformador interno que reduce la tensión alterna y luego un puente de diodos que rectifica la señal alterna. El problema más claro que se puede presentar es la necesidad de situarse cerca de redes eléctricas y contratar la energía a través de las diferentes compañías eléctricas de las zonas, si bien su alcance puede ser kilométrico, la mayoría de las redes no necesitan tanta corriente de protección catódica.

Esta alternativa es más usada comúnmente en zonas desérticas del norte del país donde la resistividad del terreno es muy alta, o en zonas donde existen interferencias eléctricas con otras redes con sus propias corrientes de protección catódica.

1.6.3 Alternativa N°3: Sistema automatizado de inyección de corriente de protección catódica

Es la alternativa definida para trabajar como una propuesta sustentable, que acomodada a los conocimientos eléctricos y de programación sumados a los provenientes de la protección catódica, logra dar una solución innovadora para los fines de la empresa, como también económicos.

1.6.4 Tabla de puntuación de alternativas de solución

Se genera una tabla de puntuación comparativa a las diversas alternativas de solución, en donde se destacan características como: Innovación, Beneficio, Factibilidad, Costo de mantenimiento, Adaptabilidad a condiciones del entorno, Impacto ambiental. (ver tablas 1-1 y

1-2). Se aprecia en los valores totales, que la alternativa 3, sistema automatizado de inyección de corriente de protección catódica, supera ampliamente a las otras alternativas, doblando la puntuación, graficando así, los altísimos beneficios que conlleva este método distinto de protección a redes de acero contra la corrosión.

Tabla 1-1. Valores de puntuación

| Tabla de puntuación de alternativas de solución | | | | |
|---|------------|-----------|-------|--------|
| Muy deficiente | Deficiente | Aceptable | Bueno | Optimo |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Fuente: Elaboración propia en base a 5 niveles de puntuación

Tabla 1-2. Puntuación de alternativas

| Característica | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|
| Innovación | 1 | 1 | 5 |
| Beneficio | 3 | 4 | 5 |
| Factibilidad | 3 | 2 | 4 |
| Costo mantenimiento | 3 | 2 | 4 |
| Adaptabilidad | 2 | 4 | 5 |
| Impacto ambiental | 3 | 2 | 5 |
| Total | 15 | 15 | 28 |

Fuente: Elaboración propia en base a características de efecto protección catódica

1.7 **PROPOSICIÓN DE SOLUCIÓN DEL PROBLEMA**

La propuesta de solución consiste en la implementación de un sistema de protección catódica automatizado y alimentado por energía solar en un punto estratégico del gaseoducto. Este sistema complementará los ánodos de sacrificio existentes, proporcionando una protección más eficiente y adaptable a las condiciones variables del suelo.

1.7.1 **Funcionamiento de la solución propuesta.**

El funcionamiento del sistema es el siguiente:

- Medición del potencial: Una celda de cobre-sulfato de cobre que actúa como un

electrodo de referencia estable, proporcionando un punto de comparación para medir el potencial de la tubería. La celda se conecta eléctricamente a la tubería del gaseoducto y a un voltímetro. El voltímetro mide de forma continua la diferencia de potencial entre la celda de referencia y la tubería, proporcionando un valor de potencial en milivoltios.

- Control automático: Un controlador programable (PLC o microcontrolador) procesa la señal del voltímetro y compara el valor medido con el rango de potencial deseado (-1300 a -1700mV). Si el potencial medido está por debajo del rango, el controlador aumenta la corriente de protección catódica inyectada en la tubería. Si el potencial está por encima del rango, el controlador reduce la corriente. La señal de salida del controlador se conecta a un dispositivo de potencia, como un tiristor o un transistor de potencia, que controla la corriente que fluye desde el banco de baterías hacia la tubería.
- Fuente de alimentación: Los paneles solares captan la energía solar y la convierten en energía eléctrica en corriente continua. Un controlador de carga solar regula la carga de las baterías, evitando su sobrecarga o descarga excesiva. Las baterías almacenan la energía generada por los paneles solares y suministran la corriente necesaria para la protección catódica, especialmente durante la noche o en días nublados.

Los ánodos de sacrificio continúan cumpliendo su función de protección catódica, especialmente en zonas donde la densidad de corriente requerida es baja. Los ánodos de sacrificio se distribuyen a lo largo de la tubería, complementando la protección proporcionada por el sistema de corriente impresa.

1.7.2 Ventajas y consideraciones adicionales.

El sistema puede integrar una plataforma de monitoreo remoto para supervisar el funcionamiento del sistema y recibir alertas en caso de anomalías. El sistema puede ser fácilmente escalado para proteger tramos más largos de tubería o para adaptarse a cambios en las condiciones del suelo. Además, puede ser configurado para adaptarse a diferentes tipos de suelos y a distintas condiciones ambientales.

A diferencia de los sistemas de corriente impresa convencionales, que suelen ser más grandes y requieren una mayor inversión inicial, el sistema propuesto es más flexible y adaptable a diferentes condiciones. La utilización de energía solar reduce significativamente el impacto ambiental en comparación con los sistemas que utilizan energía de la red eléctrica. Al

ajustar la corriente de protección catódica en función de las necesidades reales, se evita el sobredimensionamiento del sistema y se reduce el consumo de energía.

La elección de los componentes del sistema (paneles solares, baterías, controlador, ánodos) debe basarse en un análisis detallado de las condiciones del sitio y de los requerimientos del proyecto. El diseño de la instalación debe considerar aspectos como la ubicación de los componentes, la protección contra la corrosión y la seguridad. Es necesario establecer un programa de mantenimiento preventivo para garantizar el correcto funcionamiento del sistema a largo plazo.

1.8 **REQUERIMIENTOS**

Los requerimientos técnicos del sistema se centran en garantizar una protección catódica eficiente, precisa y confiable. La capacidad de corriente, la precisión del control, la confiabilidad y la adaptabilidad son aspectos clave. Por su parte, los requerimientos legales y normativos aseguran que el sistema cumpla con todos los estándares y regulaciones aplicables, garantizando la seguridad y la sostenibilidad de la solución.

1.8.1 **Requerimientos técnicos del sistema.**

- Capacidad de corriente: El sistema debe ser capaz de suministrar la corriente necesaria para mantener el potencial de la tubería dentro del rango establecido (-1300 a -1700 [mV]). Esta capacidad dependerá de la longitud de la tubería a proteger, la resistividad del suelo y el nivel de protección requerido.
- Precisión: El sistema de control debe ser capaz de regular la corriente de protección catódica con alta precisión, evitando sobreprotección o subprotección. Esto garantizará una protección óptima de la tubería y prolongará la vida útil de los ánodos.
- Confiabilidad: El sistema debe ser altamente confiable y resistente a las condiciones ambientales adversas. Los componentes utilizados deben ser de alta calidad y el diseño del sistema debe considerar factores como la redundancia y la facilidad de mantenimiento.
- Adaptabilidad: El sistema debe ser capaz de adaptarse a cambios en las condiciones del suelo y a variaciones en la demanda de corriente. Esto puede lograrse mediante la implementación de algoritmos de control inteligentes y la utilización de sensores para para monitorear las condiciones ambientales, como medir constantemente el potencial de la tubería.
- Interferencias electromagnéticas: El sistema debe ser diseñado para minimizar el

impacto de las interferencias electromagnéticas provenientes de otras fuentes, como líneas de alta tensión o sistemas de protección catódica cercanos.

1.8.2 Requisitos legales y normativos

El sistema debe cumplir con las normas internacionales de la NACE (National Association of Corrosion Engineers) para la protección catódica. Estas normas establecen los requisitos mínimos para el diseño, instalación y operación de los sistemas de protección catódica.

Las normas más relevantes aplicadas para la protección contra la corrosión son las siguientes:

- NACE SPO169 / ISO 15589 (Control de la corrosión externa en sistemas de tuberías metálicas subterráneas o sumergidas): Esta norma es fundamental para la protección catódica de tuberías. Aborda el diseño, la instalación, la operación y el mantenimiento de sistemas de protección catódica para prevenir la corrosión externa en tuberías de acero enterradas o sumergidas que transportan petróleo, gas, agua y otros fluidos. Se centra en la mitigación de la corrosión por corrientes vagabundas, interferencias de CA y otros factores.
- NACE SPO177 (Revestimiento protectores orgánicos aplicados a superficies metálicas para la protección contra la corrosión): Esta norma trata sobre la aplicación de recubrimientos protectores orgánicos y su interacción con los sistemas de protección catódica. Un buen recubrimiento reduce la demanda de corriente del sistema de protección catódica.
- NACE TMO190 (Monitoreo de la efectividad de los sistemas de protección catódica): Esta norma proporciona métodos para monitorear y evaluar la efectividad de los sistemas de protección catódica, incluyendo mediciones de potencial, inspecciones y otras técnicas.

Además de las normas internacionales, el sistema debe cumplir con las normas y regulaciones locales aplicables, incluyendo los códigos de construcción, las normas de seguridad y las regulaciones ambientales.

Se deberán obtener los permisos necesarios de las autoridades competentes para la instalación y operación del sistema.

El sistema deberá ser inspeccionado periódicamente para verificar su cumplimiento con los requisitos normativos y para garantizar su correcto funcionamiento.

1.9 **OBJETIVOS**

En esta sección se describen los objetivos generales y específicos que se deben alcanzar durante el desarrollo de este proyecto,

1.9.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta técnica integral para automatizar la protección catódica de un gaseoducto, utilizando energía solar.

1.9.2 Objetivos específicos

Para cumplir la meta impuesta en el objetivo general, se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Describir las condiciones de operación y definir los requerimientos del sistema.
- Diseñar un proyecto de automatización detallando los componentes, el sistema de control y la propuesta de ingeniería, seleccionando la configuración más eficiente y económica
- Realizar evaluación económica del proyecto

CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA AUTOMATIZADO.

2. INTRODUCCIÓN

Este capítulo se centra en la selección y el dimensionamiento de los componentes esenciales para el sistema de protección catódica. La correcta elección de cada componente es crucial para asegurar el óptimo y eficiente funcionamiento del sistema. Además, se describirá el funcionamiento del sistema en su conjunto para inyectar corriente de protección catódica de forma automatizada.

2.1 SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES

La elección adecuada de cada componente es fundamental para asegurar que el sistema de protección catódica opere de manera óptima y eficiente, además de constituirse con materiales con los más adecuados estándares de calidad para su prolongada vida útil.

2.1.1 Panel solar

Para garantizar un suministro de energía eléctrica eficiente y sostenible al sistema de protección catódica, se ha seleccionado un panel solar monocristalino de 310[W] (Ver figura 2-1). Esta elección se fundamenta en las siguientes consideraciones:

- **Potencia adecuada:** Los 310[W] de potencia nominal del panel superan ampliamente la potencia requerida para el funcionamiento del sistema de protección catódica. Este margen de potencia adicional permite compensar posibles pérdidas en el sistema, fluctuaciones en la irradiación solar y garantiza un funcionamiento óptimo incluso en condiciones climáticas adversas.
- **Eficiencia:** Los paneles monocristalinos presentan una mayor eficiencia en la conversión de energía solar en energía eléctrica en comparación con los paneles policristalino. Esto se traduce en una mayor producción de energía por unidad de área, lo cual es especialmente relevante en instalaciones con limitaciones de espacio.
- **Voltaje de trabajo:** El voltaje de trabajo nominal de 24[V] del panel se ajusta perfectamente a los requerimientos del sistema de protección catódica, lo que simplifica la configuración y reduce las pérdidas en el cableado. Además de mencionar los voltajes máximo (V_m) de 33.34[V], Voltaje circuito abierto (V_{oc}) de 40,48[V], Corriente máxima (I_{max}) de 9,3[A], Corriente de cortocircuito (I_{sc}) de 9,77(A)
- **Dimensiones y peso:** Las dimensiones compactas del panel (1684x1002x35[mm]) y su peso relativamente ligero (19[Kg]) facilitan su instalación en diversas ubicaciones,

incluso en espacios reducidos. Además, en su aplicación para este punto en específico, no es necesario elevar la instalación del panel a niveles muy superiores, puesto que no está al alcance de terceros, solo de personal calificado y de la empresa.

- Conectores MC4: Los conectores MC4 son ampliamente utilizados en la industria solar debido a su alta resistencia a la intemperie y facilidad de conexión.
- Orientación e inclinación: El panel será instalado con una orientación e inclinación óptimas para maximizar la captación de energía solar en el lugar específico de la instalación. Para este caso, se realizó el estudio a través de la página del gobierno de Chile, explorador solar, dando como resultado una inclinación de 25° y acimut 3°, lo cual es prácticamente norte.
- Estructura de montaje: Se utilizará una estructura de montaje adecuada para asegurar la estabilidad y durabilidad del panel y los componentes necesarios para el proyecto.
- Protección: Se tomarán las medidas necesarias para proteger el panel de condiciones climáticas adversas y de posibles daños físicos.



Fuente: Solarstore.cl Contenido 2023 panel solar 310W

Figura 2-1. Panel solar escogido.

2.1.2 Selección y justificación de la batería

Para garantizar un funcionamiento continuo y confiable del sistema de protección

catódica, es fundamental seleccionar una batería que cumpla con los siguientes requisitos:

- Alta capacidad: Debe poder almacenar la energía generada por el panel solar de 310[Wh] y suministrarla al sistema de protección catódica durante períodos de baja irradiación solar o en ausencia de luz.
- Ciclos de descarga profundos: La batería estará sometida a ciclos de descarga profundos de manera regular, por lo que debe ser diseñada para soportar este tipo de operación sin perder capacidad con rapidez.
- Resistencia a condiciones adversas: Dado que la batería estará expuesta a diversas condiciones ambientales, es importante que sea resistente a altas y bajas temperaturas, vibraciones y humedad.
- Baja tasa de autodescarga: Una baja tasa de autodescarga garantiza que la batería retenga la carga durante periodos prolongados sin necesidad de ser recargada.

Selección de batería: Batería de Litio Ferrofosfato (LiFePO₄) (Ver figura 2-2).

Este tipo de batería de Litio Ferrofosfato se presenta como la opción más adecuada para este tipo de aplicación debido a las siguientes ventajas:

- Alta densidad de energía: Permiten almacenar una gran cantidad de energía en un tamaño y peso relativamente pequeño. Capacidad nominal de 100[Ah], energía nominal de 1280[Wh] y un peso de 11,5[kg].
- Larga vida útil: Ofrecen una vida útil prolongada de mayor o igual a 10 años, (para este proyecto se considerará cambio cada 2 años), soportando un gran número de ciclos de carga y descarga, que se eleva a un valor mayor o igual a 3.000 ciclos a 35°C.
- Alta eficiencia: presentan una alta eficiencia en la conversión de energía, lo que se traduce en menores pérdidas durante la carga y descarga. Que en valores se traduce en una eficiencia de carga mayor o igual al 97% y una eficiencia de descarga mayor o igual al 98%.
- Seguridad: Son consideradas baterías seguras debido a su baja tasa de autodescarga y su estabilidad térmica.
- Amplio rango de temperatura de funcionamiento: Pueden operar en un amplio rango de temperaturas, lo que las hace ideales para aplicaciones en exteriores.
Temperatura de carga de 0°C a 45°C con 60 +- 25% de humedad relativa
Temperatura de descarga de -20°C a 60°C con 60 +- 25% de humedad relativa
Temperatura de almacenamiento 0°C a 40°C con 60 +- 25% de humedad relativa

Características clave de la batería LiFePO4

- Capacidad: La capacidad de la batería dependerá del consumo energético del sistema de protección catódica y del tiempo de autonomía deseado.
- Voltaje: El voltaje de la batería será compatible con el controlador de carga y el sistema de protección catódica. En este caso, se utilizarán 2 baterías de 12[V] conectadas en serie para simplificar el conexionado con el PLC, y poseer más energía almacenada en situaciones adversas, o futuras conexiones adicionales. Capacidad nominal de 100[Ah], energía nominal de 1280[Wh]
- Tasa de descarga: La tasa de descarga indica la velocidad a la que se puede extraer energía de la batería. Para este caso de suministro de protección catódica, esta tasa no requiere ser de una corriente muy elevada, del orden de los miliamperios.

Como consideraciones adicionales, la batería será instalada en un gabinete cerrado herméticamente diseñado para instalación a la intemperie, con los respectivos sistemas de ventilación. Además, de un plan de mantenimiento que garantice el correcto funcionamiento y prolongar la vida útil.



Fuente: Solartex.cl Productos baterías lifepo4

Figura 2-2. Batería escogida.

2.1.3 Controlador de carga

El controlador de carga es un componente esencial en un sistema fotovoltaico, ya que se encarga de regular la corriente y el voltaje que se suministran a la batería, protegiéndola de

sobrecargas y descargas excesivas. Para este caso, el controlador de carga también desempeñará un papel crucial en la regulación de la corriente que se suministra al sistema de protección catódica.

Características clave del controlador de carga para este proyecto (Ver figura 2-3).

- Tipo: MPPT (Seguimiento del Punto de Máxima Potencia): Estos controladores son los más eficientes, ya que optimizan la extracción de energía del panel solar, adaptando el voltaje de entrada para maximizar la potencia entregada a la batería.
- Voltaje de entrada: Debe ser compatible con el voltaje de circuito abierto (Voc) del panel solar de 310[W]. En este caso, se recomienda un controlador con un rango de voltaje de entrada que incluya los 24 [V] del panel.
- Voltaje de salida: Debe ser compatible con el voltaje nominal de la batería de litio ferrofosfato seleccionada. En esta ocasión, 24[V] para dos baterías conectadas en serie.
- Corriente de carga: Debe ser suficiente para cargar la batería en un tiempo razonable, de al menos un 50% del tiempo de producción de electricidad del panel solar (aproximadamente menor o igual a 4[hr], teniendo en cuenta la capacidad de la batería y la potencia del panel solar.
- Protecciones: Debe contar con protecciones contra sobrecarga, descarga profunda, cortocircuito, y sobre temperatura, tanta para la batería como para el controlador.



Fuente: Solartex.cl Productos controlador solar mppt

Figura 2-3. Controlador de carga escogido.

2.1.4 Controlador lógico programable, PLC Siemens Logo 24

La elección de este controlador, (Ver figura 2-4) se basa en diversas características, entre las cuales se destaca:

- Sencillez y facilidad de uso: El LOGO 24 es un PLC compacto y fácil de programar, ideal para aplicaciones relativamente sencillas como el control de un sistema de protección catódica.
- Relación calidad-precio: Ofrece una buena relación calidad-precio, siendo una opción económica para proyectos de pequeña escala, lo cual lo hace ideal para este proyecto en el cual lo compacto y sencillo de aplicar son las principales características y ventajas.
- Disponibilidad de entradas y salidas: Cuenta con 8 entradas digitales, 4 salidas digitales y una entrada analógica, suficientes para las necesidades del proyecto (medición del potencial, control de la salida de corriente).
- Compactibilidad: Su tamaño compacto permite instalarlo en espacios reducidos, como el gabinete exterior diseñado para el proyecto.
- Robustez: Diseñado para entornos industriales, el LOGO 24 es resistente a vibraciones, golpes y variaciones de temperatura, lo cual es ideal para su instalación en exteriores.
- Expansibilidad: Si en el futuro se requieren más entradas/salidas o funcionalidades adicionales, es posible expandir el sistema mediante módulos de expansión.
- Compatibilidad con el sistema: El LOGO 24 puede alimentarse directamente con la tensión de 24[Vdc] proporcionada por el sistema fotovoltaico y las baterías.



Fuente: obinu.cl Productos automatización PLC

Figura 2-4. PLC escogido.

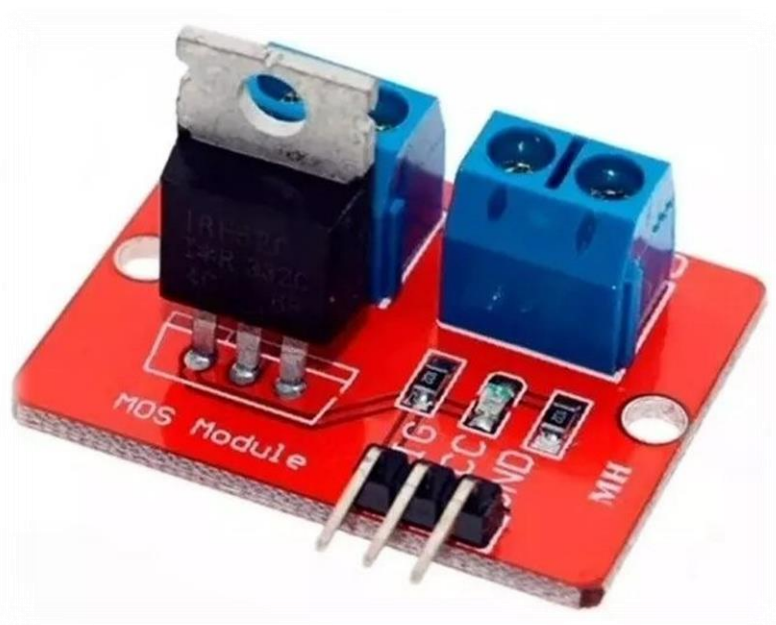
2.1.5 Selección y justificación del MOSFET para la inyección de corriente de protección catódica

Criterios de selección: Una tensión de drenaje-fuente (VDS) debe ser superior a 24[V] para garantizar un margen de seguridad. Una corriente de drenaje (ID) significativamente superior a los pick de 100[mA] esperados según histograma de la red, considerando un margen de seguridad, como ejemplo un MOSFET con una ID de 1[A] sería adecuado. Una resistencia en estado encendido (RDSon) baja, para así minimizar las pérdidas, pero puede ser menos crítica debido a las bajas corrientes involucradas. Incluso con corrientes bajas, es importante verificar la potencia disipada para asegurar que el MOSFET no se sobrecaliente. Por otro lado, la velocidad de conmutación no es un factor crítico, ya que las frecuencias de conmutación serán relativamente bajas. (Ver figura 2-5).

Justificación de la elección del MOSFET

- VDS: 60[V], lo que proporciona un amplio margen de seguridad.
- ID: 1[A], más que suficiente para cubrir las necesidades de corriente del proyecto
- RDSon: 0,075[Ω], un valor razonable para esta aplicación
- Potencia disipada: Con una corriente máxima de 100[mA] y una RDSon de 0,075[Ω], la potencia disipada será del orden de los micro watts [μW], lo cual es muy bajo y no requiere un disipador de calor.
- Paquete: TO-220, un paquete común y fácil de soldar.

- Protección del MOSFET: Aunque las corrientes esperadas son bajas, se incluirá un diodo de rueda libre para proteger el MOSFET de las sobretensiones inducidas.



Fuente: afel.cl Productos Modulo Mosfet

Figura 2-5. Modulo MOSFET escogido.

2.1.6 Selección de la celda de referencia de cobre – sulfato de cobre

¿Por qué una celda de referencia?

La celda de referencia de cobre-sulfato de cobre (CSE, por sus siglas en inglés) es un componente fundamental en los sistemas de protección catódica (Ver figura 2-6). Su función principal es proporcionar un potencial eléctrico estable y reproducible que sirva como punto de referencia para medir el potencial de la estructura a proteger (en este caso, la red de acero).

Características de la celda CSE:

- Potencial estable: Mantiene un potencial eléctrico constante y conocido en relación con el electrodo de hidrógeno estándar (EHE).
- Reproducibilidad: Permite realizar mediciones repetibles y comparables en diferentes momentos y lugares.
- Simplicidad: Su construcción es relativamente simple, lo que la hace fácil de utilizar y mantener.
- Costo: Generalmente es económica en comparación con otros tipos de electrodos de referencia.

Algunos parámetros para considerar en la elección de la celda de referencia son su

precisión, estabilidad a largo plazo, temperatura de operación, resistencia interna, tamaño y forma.

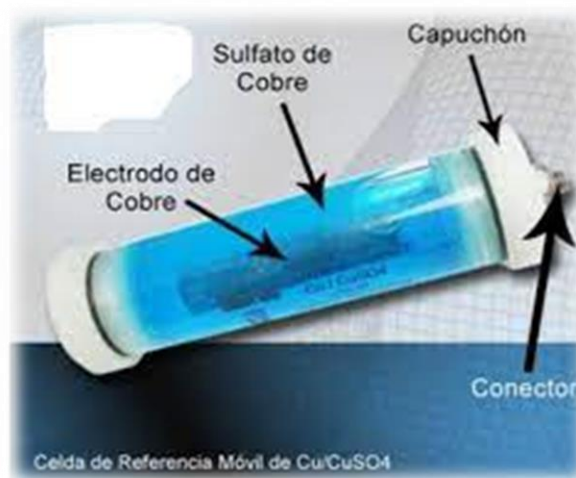
Existen tres tipos de celdas CSE. Las celdas saturadas, que contienen una solución saturada de sulfato de cobre, lo que garantiza un potencial estable. Las celdas no saturadas, que a diferencia de la anterior no está saturada en sulfato de cobre y repercute en una mayor estabilidad a largo plazo y por ultimo las celdas gel, que utilizan un gel en lugar de una solución líquida, lo que las hace menos susceptibles a derrames y fugas.

Conexión de la celda CSE al sistema de protección catódica.

La celda CSE se conecta al sistema de protección catódica a través de un cable conductor. El potencial de la estructura se mide con respecto al potencial de la celda CSE utilizando un voltímetro. La señal de salida del voltímetro se envía al PLC para su monitoreo y control.

La instalación de la celda CSE debe realizarse en un lugar adecuado, protegido de daños físicos y químicos. Es importante asegurar un buen contacto eléctrico entre la celda y la estructura a proteger. Para ello se dispone de un punto de control ya instalado en donde se tiene bornes de conexión tanto para la conexión de la tubería como para la celda de referencia permanente.

La celda CSE requiere un mantenimiento periódico para garantizar su correcto funcionamiento, la empresa dentro de sus procedimientos tiene estipulado un mantenimiento a los puntos de control de forma semestral, lo cual incluirá este punto de control automatizado de inyección de corriente de protección catódica. Este mantenimiento incluye: verificar los niveles de electrolito, la limpieza de los contactos eléctricos y la correcta medición.



Fuente: abametales.com Celda de referencia CRS40

Figura 2-6. Celda de referencia CSE.

2.1.7 Selección del ánodo para el sistema automatizado

¿Por qué un ánodo de carbón en este escenario?

Al estar conectado a una fuente de corriente controlada por el PLC, el ánodo de carbón permite ajustar la corriente de protección catódica de manera precisa y en tiempo real, complementando la acción de los ánodos de sacrificio ya instalados a lo largo de la red de acero.

El sistema puede adaptarse a cambios en las condiciones ambientales o en las demandas de protección de la estructura, al combinar ambos sistemas, se puede optimizar el consumo de energía y la vida útil de los ánodos.

El PLC permite monitorear continuamente el potencial de la estructura y ajustar la corriente de protección en consecuencia.

Existen diferentes tipos de ánodos de carbón, cada uno con sus propias características:

- Ánodos de grafito impregnado: Son los más comunes y ofrecen una buena combinación de conductividad y resistencia a la corrosión, el cual es el escogido para ser parte de este proyecto. (Ver figura 2-7).
- Ánodos de carbón vítreo: Tienen una alta resistencia a la oxidación y a la abrasión, pero son más costosos. Para este tipo de suelo relativamente resistivo, pero no abrasivo, este tipo de ánodo está por sobre lo ideal
- Ánodos de carbón metalizado: Ofrecen una alta capacidad de conducción y una buena distribución de corriente. Es una buena opción, pero se escogió la primera opción debido a que además ya se suele utilizar este tipo dentro de la empresa.

El sistema de protección catódica debe ser monitoreado regularmente para verificar su eficacia. Se deben realizar mediciones del potencial de la estructura y de la corriente suministrada por el ánodo de carbón. Además, se deben realizar inspecciones periódicas para detectar cualquier daño o deterioro en el sistema.

Actualmente la empresa cuenta con un plan de trabajo y mantenimiento semestral para toda la protección catódica de todas las redes de acero, por lo cual se deberá acoplar perfectamente este nuevo sistema a los procedimientos.



Fuente: lanincorrosion.com.ar Ánodos de grafito.

Figura 2-7. Ánodo de grafito impregnado.

2.2 CÁLCULOS REFERENTES A CONSUMOS Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

Teniendo en consideración que el sistema automatizado de inyección de corriente de protección catódica tendrá diferentes consumos de sus propios componentes, se realizó un desglose de estos para corroborar que el sistema funcionará aun en el peor mes del año donde la radiación es más baja, por ende, se tendrá menos generación. Se basó en eso, además del consumo máximo que puede tener el sistema, arrojando los siguientes resultados:

- PLC Logo 24: consumo de ~ 5 [W], ~ 208 [mAh], $\sim 0,12$ [kWh]
- MOSFET de inyección: disposición de potencia mínima
- Inyección de corriente: ~ 24 [W], 1000 [mAh], $\sim 0,576$ [kWh]
- Controlador de carga: ~ 2 [W], ~ 83 [mAh], $\sim 0,048$ [kWh]
- Pérdidas en baterías: $\sim 0,5$ [W], ~ 21 [mAh], $\sim 0,012$ [kWh]

Totales:

- Consumo total por hora: $\sim 31,5$ [W] (~ 1312 [mAh])
- Consumo total diario (24[Hr]): $\sim 0,756$ [kWh]

Autonomía del banco de baterías:

- La capacidad del banco de baterías es de $2,4$ [kWh] (24 [V] x 100 [Ah])

La autonomía sería:

- Autonomía = $\frac{\text{Capacidad de las baterías [Wh]}}{\text{Consumo total [W]}} = \frac{2400}{31.5} = \sim 76,2$ [hr] ($\sim 3,17$ [día])

Producción solar mínima:

- La generación solar mínima diaria es $1,19$ [kWh], en base a datos extraídos del

explorador solar del gobierno de Chile. (Ver figura 2-8. Datos explorador solar).

La demanda energética diaria del sistema es 0,756[kWh], lo cual es cubierto con margen por la generación mínima. Teniendo en consideración que es imposible estimar en específico la demanda de inyección de corriente a la red, debido a que es algo natural del medio.

Porcentaje de generación utilizada:

$$\text{Porcentaje utilizado} = \frac{\text{Consumo diario [kWh]}}{\text{Generación solar mínima [kWh]}} \times 100 = \frac{0.756}{1.19} \times 100 = \sim 63\%$$



Fuente: solar.minenergía.cl/fotovoltaico. Punto específico, Quillota

Figura 2-8. Datos explorador solar.

2.3 INFRAESTRUCTURA NECESARIA PARA IMPLEMENTAR EL PROYECTO DE PROTECCIÓN CATÓDICA

La infraestructura es el esqueleto sobre el cual se construye un sistema de protección catódica eficiente y duradero. Es el conjunto de elementos físicos que permiten la conexión, el funcionamiento y el control del sistema.

2.3.1 Importancia de la infraestructura.

¿Por qué es tan importante la infraestructura?

Sin una infraestructura adecuada, el sistema no podrá operar de manera correcta y no se logrará la protección deseada.

Una infraestructura bien diseñada u construida garantizara una larga vida útil del sistema. Debe ser una estructura accesible y bien organizada para facilitar las tareas de mantenimiento del sistema. Además, debe ser segura para proteger a las personas y al equipo

involucrado en la operación del sistema.

2.3.2 Elementos clave de la infraestructura.

Dentro de toda la infraestructura necesaria para la instalación de este nuevo sistema automatizado de inyección de corriente de protección catódica podemos destacar:

- Puesta a tierra: El punto de referencia eléctrico del sistema, asegurando un camino de baja resistencia para la corriente de protección.
 - Función: Además de proporcionar un camino de baja resistencia, la puesta a tierra sirve para proteger a las personas y equipos de descargas eléctricas.
 - Diseño: Material de cobre recubierto de grafito o acero inoxidable, a una profundidad de 1,5[m], con conexiones sólidas y resistentes. Para este caso, la planta en donde se ubicará este sistema automatizado de protección catódica cuenta con una malla de puesta a tierra de todos los elementos metálicos de la planta, este sistema deberá adosarse a esta puesta a tierra existente.
- Gabinete de control: El “cerebro” del sistema, donde se concentran todos los componentes electrónicos para su control y monitoreo. Además, de los elementos de protección para los mismos.

Constará de un PLC que se encargará de centralizar la lógica de control, monitorizar los sensores y activar los actuadores respectivos. Además de un controlador de carga para las baterías y las baterías en sí. Sumado, todos los elementos de protección, como disyuntores y diferenciales.

El diseño deberá ser adecuado tanto para la ventilación, protección y accesibilidad. (Ver figura 2-9)



Fuente: questinter.com Gabinetes exteriores en poste

Figura 2-9. Gabinete escogido.

- Cableado: La red de conexiones que une todos los elementos del sistema. Tanto el cableado de la protección catódica en si, como el cableado de control, el cableado de seguridad, y el cableado de energización.

Estos conductores en el exterior del gabinete estarán protegidos por tuberías (conduits) de acero galvanizado de 30[mm] de diámetro, necesarios para proteger a todos los conductores que estén expuestos a la intemperie, cabe destacar que una vez bajo la tierra, el cable deberá estar expuesto a estas condiciones y tendrá que ser un cable construido y preparado para instalaciones subterráneas sin protección, para el caso de la conexión de la celda permanente de referencia CSE. Por parte del conductor que va al ánodo este último ya consta con el conductor ideal.

- Control: Transmite señales de bajo voltaje entre los componentes del sistema.
- Potencia: Transporta la corriente de protección catódica desde el MOSFET a los ánodos.
- Sensores: conecta los sensores al PLC.
- Fuentes de alimentación: En sistemas autónomos, como el que estamos considerando, se requieren los ya mencionados paneles solares y banco de baterías. Este proyecto contempla un panel fotovoltaico y dos baterías.
- Sensores: Permiten monitorear el estado del sistema y detectar posibles anomalías, que para este caso es una celda permanente de referencia CSE que a través de un voltímetro entregará el nivel del potencial de la red de forma instantánea al PLC, el cual acudirá a su programación para mantener una potencial estable dentro del rango escogido.

También a modo de información y control para su mantenimiento constará con un amperímetro conectado al sistema para conocer la corriente de inyección instantánea.

- Poste y soporte: Poste tubular galvanizado de 4[m] y 3[mm] de espesor, con una base de 250x250x12[mm] en la cual se apenará a un bloque de hormigón de 1[m3] de volumen. Además, constará con un soporte para panel solar para montaje de este a la inclinación previamente estudiada.

2.4 PROGRAMACIÓN DEL PLC SIEMENS LOGO 24 PARA CONTROL PI DEL POTENCIAL EN PROTECCIÓN CATÓDICA

En esta sección, nos enfocaremos en la programación detallada del PLC Siemens Logo DM8 24 para implementar un control PID que regule el potencial de una estructura metálica, como lo es la red de acero de gas natural de la empresa, asegurando su protección catódica activa. El sistema utilizará una celda de referencia CSE y un voltímetro para medir el potencial, y un tiristor controlado por el PLC para ajustar la corriente de protección catódica.

2.4.1 Objetivos del control PI

Mantener el potencial de la estructura dentro de un rango predefinido es de suma importancia para garantizar una protección catódica efectiva, el rango de potencial debe ser en este caso (-1300 , -1700)[mV]. Un potencial demasiado bajo puede no ofrecer suficiente protección contra la corrosión, mientras que uno demasiado alto puede provocar la formación de hidrógeno y otros problemas.

El potencial de la estructura puede verse afectado por factores como la resistividad del suelo, la temperatura, la salinidad del agua y la actividad de las bacterias. El control PID debe ser capaz de compensar estas variaciones para mantener el potencial dentro del rango deseado.

2.4.2 Diagrama de bloques del sistema.

El diagrama de bloques deberá incluir los siguientes elementos:

- Sensor de potencial: Celda de referencia CSE conectada a la estructura y al voltímetro.
- Voltímetro: Convierte la señal analógica del sensor en una señal digital que puede ser procesada por el PLC.
- PLC siemens LOGO 24: Recibe la señal del voltímetro, calcula el error, ajusta los parámetros PID y genera una señal de control para el tiristor.
- Tiristor: Actúa como un interruptor controlado, modulando la corriente que fluye hacia la estructura.
- Estructura por proteger: La tubería de acero de la red de gas natural de la empresa que se desea proteger de la corrosión.
- Batería: Fuente de alimentación para el sistema.

2.4.3 Variables y señales.

Las variables y señales son los elementos fundamentales que interactúan en un sistema de control PID. En el contexto de la protección catódica, cada una cumple un papel específico:

- Variable de proceso (PV): Es la medida real de la variable que se desea controlar, en este caso, el potencial eléctrico de la estructura a proteger. Se obtiene a través de la celda de referencia CSE y el voltímetro. El voltímetro convierte la señal analógica proveniente de la celda en una señal digital que el PLC puede procesar. La importancia principal es representar el estado actual del sistema y es la entrada principal para el controlador PID.
- Punto de Set (SP): Es el valor deseado de la variable de proceso, es decir, el potencial al que se quiere mantener la estructura. Se establece en función de las recomendaciones del fabricante de la estructura y las condiciones ambientales, además, del historial más favorable del potencial a lo largo de los años de la tubería. Su importancia radica en la referencia para calcular el error y determinar la acción de control.
- Error: Es la diferencia entre el punto de set y la variable de proceso, se obtiene restando el PV del SP. En definitiva, es la señal que el controlador PID utiliza para calcular la salida. Un error positivo indica que el potencial es menor al deseado y se debe aumentar la corriente de protección. Un error negativo indica que el potencial es mayor al deseado y se debe disminuir la corriente de protección.
- Salida del controlador PI: Es la señal que el controlador PI genera para ajustar el actuador (tiristor) y modificar la corriente de protección. Generalmente es una señal analógica (por ejemplo, 0-10[V]) que representa un porcentaje de apertura del tiristor. Se encarga de determinar la cantidad de corriente que se inyecta en la estructura para mantener el potencial deseado.
- Señal de control del tiristor: Es la señal digital que activa o desactiva el tiristor. Se obtiene a partir de la salida del controlador PID, comparándola con un umbral predefinido. Controla directamente el flujo de corriente hacia la estructura.

2.4.4 Estructura del programa

Como ya mencionamos, la programación del PLC Logo 24 se basa en una estructura modular y jerárquica. Esto significa que el programa se divide en bloques funcionales que realizan tareas específicas y se organiza en una estructura lógica.

- Bloque de inicialización:

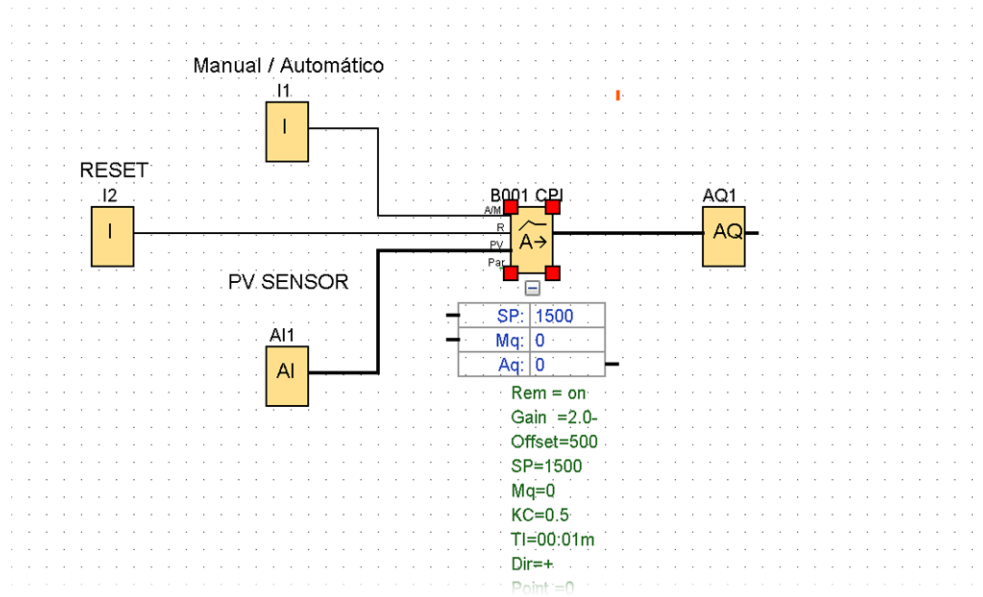
- Configuración de las entradas y salidas: Definición de cada entrada y salida (digital o analógica) y asignación de sus direcciones.
- Configuración de comunicaciones: Si se requiere en un futuro ampliar el proyecto en temas de comunicación con otros dispositivos, se configuran los parámetros de comunicación, como la velocidad, paridad, etc.
- Configuración de los temporizadores y contadores: Si bien este proyecto, no requiere temporizadores, ya que la inyección debe ser inmediata, rápida y eficaz, por requerimiento de opciones futuras se podría agregar contadores, a método de estudio de variabilidad de potenciales.
- Inicialización de variables: Se asignan valores iniciales a las variables globales y locales, para este caso la variable principal, será la medición instantánea del potencial de la tubería.
- Bloque de lectura de datos:
 - Lectura de la entrada analógica correspondiente al voltímetro: Se utiliza un bloque de función específico para leer el valor del potencial de la estructura.
 - Conversión de unidades: Si es necesario, se realiza la conversión de unidades, por ejemplo, de [V] a [mV]. Dependiendo de la señal entregada y su magnitud.
 - Filtrado de la señal: Se puede aplicar un filtro digital para reducir el ruido en la señal medida. Generalmente durante el día la señal puede verse afectada.
- Bloque de cálculo del error:
 - Cálculo de la diferencia entre el valor medido (PV) y el valor deseado (SP): Se realiza una resta simple entre ambas variables.
 - Limitación del error: Se pueden implementar límites para evitar valores de error excesivamente grandes, lo cual es probable por pick altos de medición.
- Bloque PI:
 - Selección del algoritmo PI: Se elige el algoritmo PI más adecuado (P, PI, PID) en función de las características del proceso.
 - Configuración de los parámetros PI: Se ajustan los parámetros K_p , K_i , K_d para obtener el comportamiento deseado.
 - Cálculo de la salida del controlador: Se utiliza un bloque de función PID para calcular la salida del controlador en función del error y los parámetros configurados.
- Bloque de salida:

- Conversión de la salida del controlador a una señal adecuada para el actuador: La salida del controlador PI se convierte en una señal digital (ON/OFF) para controlar el tiristor.
- Activación del actuador: Se activa la salida digital correspondiente al tiristor para ajustar la corriente de protección.
- Bloque de registro de datos:
 - Almacenamiento de datos: Se almacenan los valores de las variables de proceso en una memoria interna del PLC para posterior análisis de datos, según hoja de mantenimiento programado semestral.

2.4.5 Simulación del comportamiento de la señal.

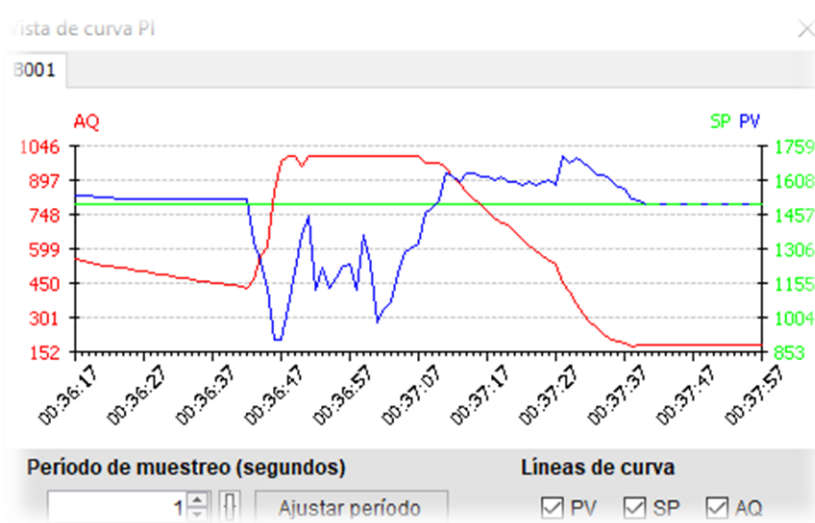
Se realizó una simulación del sistema de control (Ver figura 2-10 y 2-11), en donde se puede apreciar que a medida que el sensor (línea azul), disminuye en su medición (se vuelve más positiva la medición), recordar que para un protección óptima se debe estar para este proyecto, entre los valores de -1300 y -1700 milivoltios, por ende, cuando el sensor que medirá en intervalos de 30 segundos, note que la medición esta por sobre los valores de -1300 milivoltios, o sea, más positivo, actuara el sistema PI programado en el PLC, en donde se puede apreciar un aumento de la señal (línea roja) para así comandar la salida del PLC que controla al inyector de corriente MOSFET, logrando de esta manera, volver la señal a posicionarse dentro del rango previamente establecido que será el promedio de -1500 milivoltios (set point).

Dentro de la simulación se puede apreciar un interruptor digital que accionado pasa a ser una inyección de corriente manual constante y al permanecer desactivado, la inyección será automatizada. También existe un reset en caso de alguna falla.



Fuente: Simulador Confort Siemens

Figura 2-10. Diagrama programación.



Fuente: Simulador Confort Siemens

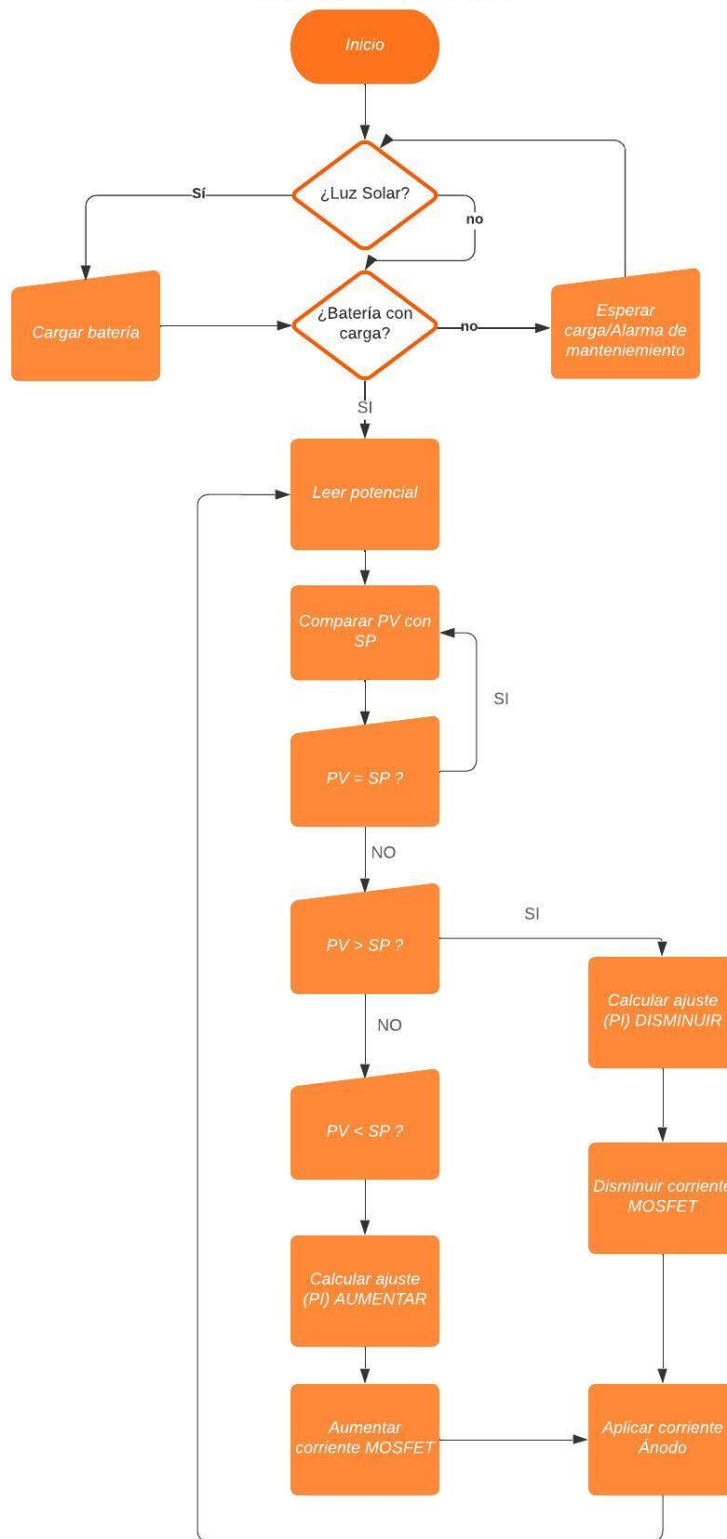
Figura 2-11. Gráficas simuladas.

2.4.6 Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema

El control automatizado de la corriente de protección catódica se basa en un algoritmo implementado en el PLC Siemens LOGO 24. Este algoritmo realiza un monitoreo constante del potencial de la estructura, comparándola con un valor de referencia (set point) y ajustando la corriente inyectada a través del ánodo mediante un control PI. Para visualizar de forma clara y concisa la secuencia de operaciones y la toma de decisiones del PLC, se presenta a continuación el diagrama de flujo del funcionamiento del sistema (ver figura 2-12). Este diagrama detalla el proceso de lectura del potencial, el cálculo del error, la aplicación del control PI, la gestión de la energía proveniente del panel solar y la respuesta del sistema ante diferentes escenarios.

Diagrama de flujo

Rodrigo Araya Valencia | March 19, 2025



Fuente: Lucid.app Aplicación online

Figura 2-12. Diagrama de flujo

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA

3. INTRODUCCIÓN

Este capítulo se enfoca en la evaluación económica del proyecto de implementación del sistema automatizado de inyección de corriente de protección catódica. El objetivo principal es determinar la viabilidad del proyecto, analizando los costos asociados, los ingresos potenciales y la rentabilidad a largo plazo. Se presentarán los cálculos detallados de los costos de mano de obra, los ingresos y egresos, las tablas de depreciación y amortización, los flujos de caja bajo diferentes escenarios.

3.1. DETERMINACIÓN DE LA MANO DE OBRA

La determinación precisa de los costos de mano de obra es fundamental para evaluar la viabilidad económica de cualquier proyecto. En el caso del sistema automatizado de inyección de corriente de protección catódica, esto implica calcular tanto las horas de trabajo necesarias como el valor monetario asociado a esas horas.

Se dividirá en dos etapas, la primera etapa a cargo exclusivamente del ingeniero en control e instrumentación industrial, que constará del diseño para el tramo individual al cual se le efectuará este sistema de protección catódica, la adquisición de los materiales y su recepción.

3.1.1 HORAS DE MANO DE OBRA

Este subpunto se centra en la cuantificación del tiempo que requerirá cada etapa del proyecto. Para ello, es esencial descomponer el proyecto en tareas específicas y estimar las horas necesarias para completar cada una. Algunas de las tareas a considerar son:

Primera etapa:

- Diseño e ingeniería:
 - Elaboración de planos y diagramas del sistema por punto: Se estima un total de 3 horas requeridas para esta tarea.
 - Selección y dimensionamiento de componentes: Se estima un total de 2 horas requeridas para esta tarea.
 - Diseño de la lógica de control del PLC: Se estima un total de 1 hora requerida para esta tarea.
 - Adquisición de materiales:
 - Investigación y comparación de precios de los componentes: Para esta tarea se

efectúa un total de 4 horas para la correcta realización de esta tarea.

- Elaboración de órdenes de compra y gestión de proveedores: Esta tarea se extrema en 4 horas variables dependientes de factibilidad de empresas proveedoras.
- Recepción y verificación de materiales: Para esta tarea se requerirá un total de 2 horas para la correcta verificación de los materiales y su funcionamiento.

Segunda etapa

- Instalación:
 - Montaje de los componentes en el gabinete de control: Esta tarea empleará un total de 2 horas, por el orden de los componentes y la correcta instalación para evitar futuras fallas de conexionado.
 - Instalación del panel solar y la batería: con un total de 2 horas de trabajo para lograr fijar perfectamente el panel solar con los resguardos necesarios para evitar accidentes y la fijación segura de las baterías dentro del gabinete.
 - Cableado y conexión de los diferentes elementos del sistema: El punto clave del correcto funcionamiento automatizado del sistema merece una atención exagerada en el conexionado del sistema en sí, un punto clave puede situarse en realizar una conexión directa con la tubería de acero si es que no hay un cable ya conectado, en tal caso se debe realizar una excavación que conlleva un tiempo total de 6 horas para realizar todas las tareas o por el contrario si se tiene ya el lugar con un punto de control existente (el cable conectado a la tubería) se estimará un total de 4 horas, con diferentes realizaciones de pruebas de conexionado y mediciones de continuidad.
 - Instalación del ánodo de carbón y la celda de referencia: Esta tarea debe estar ligada a elegir el lugar más eficiente para el drenaje de corriente (menos resistivo), realizando una medición de resistividad del terreno, luego elegido el lugar se debe realizar una excavación para depositar el ánodo, luego guiar al cable del ánodo hasta su conexionado final con el sistema, para ello se necesitará un total de 5 horas por variaciones de terrenos, y mediciones a realizar.
- Programación y puesta en marcha:
 - Programación del PLC Siemens LOGO 24: Esta tarea de programación se realiza de forma repetitiva solo variando algunos valores dependiendo del set point deseado, se estima 1 hora para la correcta realización.

- Configuración de los parámetros del controlador PI: Los parámetros vendrán dados del estudio previo de resistividad del terreno y el potencial eléctrico de la tubería medido a lo largo de los días, revisando el historial más actual, se establece 1 hora para esta tarea.
- Pruebas de funcionamiento: La aplicación que viene de la mano con este tipo de controlador permite la simulación del programa realizado para poder obtener un funcionamiento teórico correcto previo al conexionado en terreno, dentro de la misma hora anterior se realiza esta tarea.
- Pruebas y ajustes:
 - Medición del potencial de la estructura y ajuste de los parámetros del control PI: Una vez en terreno con los artefactos conectados se pueden realizar mediciones directas del potencial de la red y compararlo con el funcionamiento del controlador y verificando su correcto funcionamiento y posterior a esas pruebas ajustar los parámetros a la función más efectiva para el punto de control de la red en cuestión, para esta tarea en terreno se estipula 1 hora de trabajo.
 - Verificación del correcto funcionamiento de las protecciones: Uno de los artefactos más importantes de la instalación son los equipos de protecciones eléctricas que cuidaran a los componentes internos de fluctuaciones eléctricas en el ambiente, actuando cuando corresponda y para ello se hacen pruebas de funcionamiento a estos equipos de protección, se estima 1 hora de pruebas de funcionamiento.
 - Generación de informes de prueba: Una vez realizada las tareas y teniendo el sistema operando sin inconvenientes, se debe realizar un informe detallado de pruebas y ajustes que se realizaron para en un futuro según cambien las condiciones poder abordar según lo diseñado, se estipula 3 horas de trabajo para esta tarea.

3.2 VALOR POR HORA.

Este subpunto se enfoca en la determinación del costo monetario asociado a cada hora de trabajo. Para ello, es necesario considerar los siguientes factores:

Salarios del personal: Se deben considerar los salarios brutos del personal involucrado en cada tarea, incluyendo ingenieros, técnicos e instaladores. Al ser este un proyecto de instalación para una empresa de gas, como lo es Gasvalpo. Se consideran trabajos con empresas contratistas para el montaje del poste y excavación pertinente para el punto de control, estas

labores se realizan frecuentemente con la empresa contratista y ya posee la reglamentación necesaria para un trabajo seguro y eficaz. Los valores asociados a estos trabajos ya están en regla. Pero las labores del ingeniero e instalador del proyecto es algo totalmente aparte.

Se calcula un costo mensual por persona de:

- Ingeniero en control e instrumentación industrial: $1.500.000 + (\text{salario} * 0,3) = 1.950.000\text{CLP}$. (incluyendo un 30% del salario por salud, pensión, alimentación, movilización, etc.)

- Técnico electricista: $800.000 + (\text{salario} * 0,3) = 1.040.000\text{CLP}$

- El cálculo por costo de horas para una jornada laboral normal de 40 horas semanales:

$1.950.000\text{CLP}/160\text{ horas} = 12.187,5\text{CLP/hora}$ para el ingeniero

$1.040.000\text{CLP}/160\text{ horas} = 6.500\text{CLP/hora}$ para el electricista

- La distribución del total de horas son las siguientes:

Tiempo total del ingeniero: 36 horas (1° y 2° etapa)

Tiempo total del electricista: 17 horas. (2° etapa)

- Costo total del ingeniero en control e instrumentación industrial:

$36\text{ horas} * 12.187,5\text{CLP/hora} = 438.750\text{CLP}$

- Costo total del electricista:

$17\text{ horas} * 6.500\text{CLP/hora} = 110.500\text{CLP}$.

En resumen: el costo total de mano de obra incluyendo al ingeniero y electricista para las tareas de montaje y puesta en marcha, sin tener en consideración los costos asumidos para la empresa contratista, es de 549.250CLP, además se considera un valor de diseño por cada instalación de este sistema de 500.000CLP.

Total, diseño y mano de obra: 1.049.250CLP

3.3 COSTO DE INSTALACIÓN Y MATERIALES.

Los costos de instalación están separados en 2 entidades, la que se clarificó anteriormente y una empresa contratista que se encarga de montaje del poste y excavación

3.3.1 Costo de instalación.

La empresa contratista ya posee sus precios estandarizados para diferentes trabajos que realiza para la empresa, los cuales entran en consideración para este proyecto.

La instalación por parte de la empresa conlleva: realizar la excavación para la instalación

de los ánodos de carbono, soldadura de cables a la tubería, montaje de poste con losa de hormigón. Lo que eleva a un valor de 5.838.192CLP Según cotización proporcionada visualmente por el encargado de protección catódica de la empresa.

Por otro lado, el diseño, instalación y puesta en marcha por parte del equipo de electricista será de un valor de 1.049.250CLP.

El detalle de los valores se puede apreciar en la Tabla 3-1 de Costos de instalación

Tabla 3-1. Costos de instalación

| Alternativas de protección catódica | Costo de instalación | | | | |
|---|----------------------|----------|--------|---------------------------|------------|
| | CLP | USD | UF | Cantidad por año estimada | Total (UF) |
| Instalación de punto de control para inyección de corriente de protección catódica con panel fotovoltaico | \$ 6.887.442 | \$ 7.326 | 177,08 | 1 | 177,08 |

Fuente: Elaboración propia en base a valores en el mercado marzo 2025

3.3.2 Costos de materiales.

Para este proyecto se considerará todos los materiales e instrumentos necesarios para la correcta puesta en marcha.

Se destaca que esta estimación es una compra de una vez en el año y se estima el cambio total de los materiales más críticos cada dos años que pueden presentar mayor desgaste como lo pueden ser: Baterías, paneles solares, puesta a tierra, entre otras. Como caso especial, se debe considerar que los ánodos de carbono estarán instalados por al menos 25 años, sin necesidad de cambio, solo medición de potencial. El ánodo de carbono estará degradándose poco a poco a lo largo del tiempo y del uso, es por ello por lo que no se considerará como reemplazo de material.

El costo de los materiales es de un valor de 1.396.376CLP. Se pueden visualizar los valores en la tabla 3-2 Costos de materiales general y el detalle del costo de los componentes en la tabla 3-3 Costos materiales en detalle.

Tabla 3-2 Costos de materiales general.

| Alternativas de protección catódica | Costos materiales | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|-----|----|---------------------------|------------|
| | CLP | USD | UF | Cantidad por año estimada | Total (UF) |

| | | | | | |
|---|--------------|----------|----|-----|----|
| Instalación de punto de control para inyección de corriente de protección catódica con panel fotovoltaico | \$ 1.396.376 | \$ 1.485 | 36 | 0,5 | 18 |
|---|--------------|----------|----|-----|----|

Fuente: Elaboración propia en base a valores en el mercado marzo 2025

Tabla 3-3 Costos de materiales en detalle.

| Tabla de componentes y materiales para la realización del proyecto | | | | | | | | |
|--|----------|------------------|-----------|------------------|-----------------|--|----------------------|-------------------------|
| Componente | cantidad | dimensiones (mm) | peso (kg) | costo unidad(\$) | Valor Total(\$) | características técnicas | Consumo diario (kWh) | Generación diaria (kWh) |
| Inyección de corriente de protección catódica | 1 | NA | NA | NA | \$ - | Inyección de corriente de protección catódica basado en un consumo promedio diario de 1Ah | 0,576 | NA |
| baterías | 2 | 329x172x219 | 12,9 | \$ 376.529 | \$ 753.058 | Voltaje nominal: 12.8V Capacidad nominal:100Ah Energía nominal: 1280Wh Voltaje de carga: 14.6V Corriente de carga: 20A | 0,012 | NA |
| Panel solar | 1 | 1684x1002x35 | 19 | \$ 125.000 | \$ 125.000 | Potencia máxima: 310W Voltaje nominal: 33,34V Corriente (Lpm): 9,3A Tensión en OC: 40,48V Corriente en CC: 9,77A | NA | 1,2 |
| Controlador de Carga, Tracer2210A 20A, 12/24V autowork | 1 | 220x154x52 | 1,1 | \$ 61.318 | \$ 61.318 | Voltaje nominal: 12/24V auto Corriente carga nominal: 20A Corriente descarga nominal: 20A | 0,048 | NA |

| | | | | | | | | |
|---------------------|---|-------------|------|---------------|---------------------|---|------|----|
| | | | | | | Rango voltaje IN: 8~32V máximo potencia IN: 520W (24V) | | |
| PLC Logo 24 | 1 | 72x90x55 | 0,5 | \$ 110.000 | \$ 110.000 | Temperatura de operación: 0-55°C Rango mínimo de voltaje: 10,8V Rango máximo de voltaje: 28,8V | 0,12 | NA |
| MOSFET | 1 | 34x17x12 | 0,01 | \$ 2.000 | \$ 2.000 | Tensión: 3,3 a 5V Tensión salida de carga: 0 a 24V Corriente salida de carga: <5A | ~0 | NA |
| Gabinete NEMA 3R | 1 | 711x609x406 | 22 | \$ 345.000 | \$ 345.000 | Capacidad de carga: 75Kg Material: Acero galvanizado Grado de protección: IP65 | NA | NA |
| Total materiales | | | | | \$ 1.396.37 6 | | | |

Fuente: Elaboración propia en base a valores en el mercado enero 2025

3.4 BENEFICIOS.

La implementación del sistema automatizado de corriente de protección catódica ofrece una serie de beneficios significativos para la empresa, tanto en términos económicos como operativos y ambientales.

3.4.1 Reducción de costos operativos.

Análisis comparativo de costos:

- Sistema actual: Instalación de punto de control con camada de ánodos de sacrificio
 - Costo de instalación: 3.041.672 CLP (78,2 UF).
 - Costo de materiales: 7.461.164 CLP (191,83 UF).
 - Cantidad por año: 2 instalaciones.
 - Costo anual total: 21.005.672 CLP (540,07 UF).

Este sistema requiere dos instalaciones anuales para mantener la protección catódica y el plan de mantenimiento de la empresa, lo que resulta un costo anual elevado debido tanto a mano de obra como a los materiales.

- Sistema Alternativo tradicional: Montaje de rectificador para corriente impresa.
 - Costo de instalación: 11.146.429 CLP (286,58 UF).
 - Costo de materiales: 16.581.875 CLP (426,33 UF).
 - Cantidad por año: 1 instalación (con dependencia suministro eléctrico Chilquinta).
 - Costo anual total: 27.728.304 CLP (712,92 UF).

Este sistema, aunque requiere una única instalación anual, implica un costo inicial y de materiales significativamente mayor, además de depender constantemente de un suministro eléctrico de Chilquinta y todas sus implicancias, resultando un costo anual más alto de las tres opciones.

- Sistema propuesto: Instalación de punto de control para inyección de corriente de protección catódica automatizada con panel fotovoltaico.
 - Costo de instalación: 6.887.442 CLP (177,08 UF).
 - Costo de materiales: 1.396.376 CLP (36 UF).
 - Cantidad por año: 1 instalación (reemplazo de piezas críticas cada 2 años)
 - Costo anual total: 7.585.630 CLP (192,03 UF).

Este sistema combina una instalación anual con un reemplazo de materiales críticos cada 2 años, lo que reduce drásticamente los costos operativos en comparación a las otras dos. Donde más se aprecia la diferencia en los costos, es en el valor de instalar una nueva camada de ánodos de sacrificio en donde se deben instalar 10 ánodos 2 veces al año y el valor por ánodo es de aproximadamente 9 UF cada ánodo (180 UF por año solo en ánodos de sacrificio). Ver tabla 3-4 Comparación valores por alternativas de protección catódica. Ver tabla 3-5 Comparación económica.

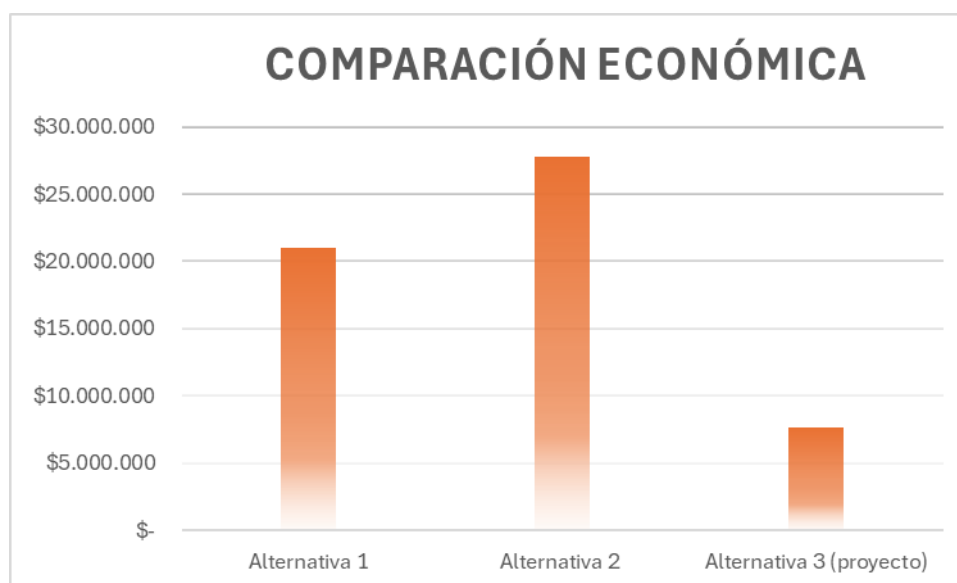
Tabla 3-4. Comparación valores por alternativas de protección catódica.

| Alternativas de protección catódica | Costo de instalación | | | | | Costos materiales | | | | |
|-------------------------------------|----------------------|-----|----|---------------------------|------------|-------------------|-----|----|---------------------------|------------|
| | CLP | USD | UF | Cantidad por año estimada | Total (UF) | CLP | USD | UF | Cantidad por año estimada | Total (UF) |

| | | | | | | | | | | | |
|---------|---|---------------|---------------|--------------------------|--------------|--------|---------------|-----------|--------|-----|--------|
| 1 | Instalación de punto de control con camada de ánodos | \$ 3.041.672 | \$ 3.235 | 78,20 | 2 | 156,41 | \$ 7.461.164 | \$ 7.936 | 191,83 | 2 | 383,67 |
| 2 | Montaje de rectificador de corriente impresa | \$ 11.146.429 | \$ 11.855 | 286,58 | 1 | 286,58 | \$ 16.581.875 | \$ 17.637 | 426,33 | 1 | 426,33 |
| 3 | Instalación de sistema automatizado de corriente de protección catódica | \$ 6.887.442 | \$ 7.326 | 177,08 | 1 | 177,08 | \$ 1.396.376 | \$ 1.485 | 35,90 | 0,5 | 17,95 |
| Totales | Alternativa 1 | Alternativa 2 | | Alternativa 3 (proyecto) | | | | | | | |
| | CLP | UF | CLP | UF | CLP | UF | | | | | |
| | \$ 21.005.672 | 540 | \$ 27.728.304 | 713 | \$ 7.585.630 | 195 | | | | | |

Fuente: Elaboración propia en base a valores en el mercado marzo 2025

Tabla 3-5. Gráfica de comparación económica.



Fuente: Elaboración propia en base a valores en el mercado marzo 2025

3.5 INGRESOS Y EGRESOS

En base a los datos recopilados en la empresa se obtuvieron valores estimados de gastos actuales anuales, con ello se puede estimar, en diferentes situaciones, el ahorro (ingresos) y los egresos según correspondan.

3.5.1 Ingresos esperados (Ahorros).

Los “ingresos” en este proyecto se traducen en los ahorros generados por la implementación del sistema automatizado de inyección de corriente de protección catódica en

comparación con las alternativas existentes.

- Ahorro anual estimado:
 - Sistema actual (ánodos de sacrificio): 540 UF anuales
 - Sistema propuesto (automatizado): 195 UF anuales
 - Ahorro anual: 540 UF – 195 UF = 345 UF.

Este ahorro anual de 345 UF representa el ingreso esperado del proyecto. Al implementar el sistema automatizado, la empresa reducirá sus costos operativos en esta cantidad cada año.

- Proyección de ahorros:

Para una mejor comprensión del impacto a largo plazo, podemos proyectar los ahorros durante la vida útil estimada del sistema. Por ejemplo, si se estima una vida útil de 10 años:

- Ahorro total en 10 años: 345 UF/año * 10 años = 3.450 UF

3.5.2 Egresos.

Los egresos incluirán los siguientes costos asociados a la creación e implementación del sistema automatizado de corriente de protección catódica:

- Costos de adquisición de materiales: Paneles fotovoltaicos, baterías solares, PLC Siemens, etc.
- Costos de mano de obra: Montaje y puesta en marcha calculados en el punto 3.2, en donde se hace alusión a costos de mano de obra pertinentes a los trabajos de montaje de componentes y puesta en marcha del sistema.
- Costos de instalación: Asumidos por la empresa y sus contratistas, para ámbitos de transporte, instalación de poste y excavaciones para la instalación de ánodo y conexión eléctrica con la tubería a proteger.
- Costos de mantenimiento preventivo: Estimados para la vida útil del sistema, se debe contemplar un costo de mantenimiento al sistema, todo lo dentro del gabinete más el panel solar, para que todo en su conjunto funciones de la forma más eficaz posible en la mayor cantidad de tiempo.
- Costos iniciales (inversión):
 - Costo total de instalación: 6.887.442 CLP (177,08 UF)
 - Costo total de materiales: 1.396.376 CLP (35,90 UF)
 - Inversión total inicial: 8.283.818 CLP (212,98 UF)
- Costos anuales de mantenimiento (después de la implementación):

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Total Anual | -213 | 118 | 104 | 118 | 104 | 118 | 104 | 118 | 104 | 118 | 104 |
| Flujo Neto de Caja | -213 | 118 | 104 | 118 | 104 | 118 | 104 | 118 | 104 | 118 | 104 |
| Flujo de Caja Acumulado | -213 | -95 | -91 | 27 | 131 | 249 | 354 | 471 | 576 | 694 | 798 |
| TMAR | 10% | | | | | | | | | | |
| VAN | 463,77 | | | | | | | | | | |
| TIR | 52% | | | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia en base a valores en el mercado marzo 2025

Este escenario inicial y más optimista, donde se cumplen las expectativas originales del proyecto.

Se caracteriza por:

- Ahorros anuales de 345 UF.
- Costos de mantenimiento anuales varían de 195 UF y 213 UF, alternándose cada año. Esta estimación se debe a mantenimientos programados o no programados que requieren mayor inversión en años alternos.
- Depreciaciones estimadas acorde al mercado actual chileno.
- Flujo de caja acumulado presenta una tendencia positiva a lo largo de los 10 años estimados, alcanzando 798 UF al final del período.
- Considerando un TMAR del 10% para la empresa siendo un proyecto pionero en la industria y en las técnicas actuales de protección catódica.
- VAN, se estima y calcula en 463,77 UF, lo que indica que el proyecto es viable y generará valor por encima de la TMAR.
- TIR por su parte se estima en un 52%, lo que supera significativamente la TMAR y refuerza la viabilidad del proyecto.

Tabla 3-7. Estimación económica del proyecto en un caso neutro

| Estimación económica del proyecto en un caso NEUTRO (UF) | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Concepto | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 | Año 8 | Año 9 | Año 10 |
| Ingresos (Ahorros) | 0 | 320 | 320 | 320 | 320 | 320 | 320 | 320 | 320 | 320 | 320 |
| Costos Fijos (Mantenimiento) | 0 | 205 | 225 | 205 | 225 | 205 | 225 | 205 | 225 | 205 | 225 |
| Depreciaciones | 0 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| Utilidad Antes de Impuesto | 0 | 94 | 74 | 94 | 74 | 94 | 74 | 94 | 74 | 94 | 74 |
| Impuesto (25%) | 0 | 23 | 18 | 23 | 18 | 23 | 18 | 23 | 18 | 23 | 18 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Utilidad Después de Impuesto | 0 | 70 | 55 | 70 | 55 | 70 | 55 | 70 | 55 | 70 | 55 |
| Depreciaciones | 0 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| Inversión en puesta en marcha | -213 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total Anual | -213 | 92 | 77 | 92 | 77 | 92 | 77 | 92 | 77 | 92 | 77 |
| Flujo Neto de Caja | -213 | 92 | 77 | 92 | 77 | 92 | 77 | 92 | 77 | 92 | 77 |
| Flujo de Caja Acumulado | -213 | -121 | -45 | 47 | 123 | 215 | 292 | 383 | 460 | 551 | 628 |
| TMAR | 10% | | | | | | | | | | |
| VAN | 354,21 | | | | | | | | | | |
| TIR | 39% | | | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia en base a valores en el mercado marzo 2025

Este escenario representa una situación intermedia, donde se presentan algunos desafíos y se requiere realizar mejoras y cambios adicionales.

Se caracteriza por:

- Ahorros anuales de 320 UF (ligeramente menores que en el caso favorable).
- Costos de mantenimiento anuales de 205 UF y 225 UF alternándose cada año. Esto indica que se requieren más mantenimientos que en el caso favorable.
- Depreciaciones estimadas acorde al mercado actual chileno.
- Flujo de caja, presenta una tendencia positiva a lo largo de los 10 años, alcanzando 628 UF al final del período.
- Considerando un TMAR del 10% para la empresa siendo un proyecto pionero en la industria y en las técnicas actuales de protección catódica.
- VAN se calcula y estima en 354,21 UF, lo que indica que el proyecto sigue siendo viable y generará valor por encima de la TMAR, aunque en menor medida que el caso favorable.
- TIR se estima en un 39%, lo que supera la TMAR, pero es menor que en el caso favorable, reflejando una menor rentabilidad.

Tabla 3-8. Estimación económica del proyecto en un caso desfavorable.

| Estimación económica del proyecto en un caso DESFAVORABLE (UF) | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Concepto | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 | Año 8 | Año 9 | Año 10 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ingresos (Ahorros) | 0 | 290 | 290 | 290 | 290 | 290 | 290 | 290 | 290 | 290 | 290 |
| Costos Fijos (Mantenimiento) | 0 | 220 | 245 | 220 | 245 | 220 | 245 | 220 | 245 | 220 | 245 |
| Depreciaciones | 0 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| Utilidad Antes de Impuesto | 0 | 49 | 24 | 49 | 24 | 49 | 24 | 49 | 24 | 49 | 24 |
| Impuesto (25%) | 0 | 12 | 6 | 12 | 6 | 12 | 6 | 12 | 6 | 12 | 6 |
| Utilidad Después de Impuesto | 0 | 37 | 18 | 37 | 18 | 37 | 18 | 37 | 18 | 37 | 18 |
| Depreciaciones | 0 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| Inversión en puesta en marcha | -213 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total Anual | -213 | 58 | 39 | 58 | 39 | 58 | 39 | 58 | 39 | 58 | 39 |
| Flujo Neto de Caja | -213 | 58 | 39 | 58 | 39 | 58 | 39 | 58 | 39 | 58 | 39 |
| Flujo de Caja Acumulado | -213 | -155 | -116 | -58 | -19 | 39 | 78 | 136 | 175 | 232 | 272 |
| TMAR | 10% | | | | | | | | | | |
| VAN | 180,37 | | | | | | | | | | |
| TIR | 19% | | | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia en base a valores en el mercado marzo 2025

Este es el caso más pesimista, donde se presentan mayores dificultades y se requiere realizar cambios significativos.

Se caracteriza por:

- Ahorros anuales de 290 UF (considerablemente menores que en los casos anteriores).
- Costos de mantenimiento anuales varían desde 220 UF a 245 UF, alternándose cada año. Esto indica que se requieren muchos más mantenimientos y/o reparaciones que en los otros escenarios.
- Depreciaciones estimadas acorde al mercado actual chileno.
- Flujo de caja presenta una tendencia positiva a lo largo de los 10 años de estimación, alcanzando 272 UF al final del período.
- Considerando un TMAR del 10% para la empresa siendo un proyecto pionero en la industria y en las técnicas actuales de protección catódica.
- VAN se calcula y estima en 180,37 UF, lo que indica que el proyecto aún es viable y generará valor por encima de la TMAR, aunque en una medida mucho menor que en los casos favorable y neutro.

- TIR se estima en un 19%, lo que supera la TMAR, pero es significativamente menor que en los otros escenarios, reflejando una rentabilidad mucho menor.

3.6 CARTA GANTT

La carta Gantt es una herramienta esencial para la gestión exitosa de este proyecto. Facilita la planificación, organización, seguimiento y comunicación, lo que contribuye a asegurar que el sistema automatizado de inyección de corriente de protección catódica se implemente de manera eficiente y dentro de los plazos previstos.

Se destacan la separación de las 2 etapas implementación de este proyecto en donde las tareas 1 y 2 serán desarrolladas por el ingeniero en control e instrumentación industrial, denominada etapa de diseño, de uso exclusivo para este tramo de gaseoducto.

Y las tareas 3 y 4 son de implementación y puesta en marcha del proyecto, en donde participan en primera instancia el ingeniero a cargo y el técnico electricista, con la coordinación de la empresa contratista para montaje. Ver tabla 3-9 Carta Gantt.

Tabla 3-9. Carta Gantt

| Etapa | Tarea | Semana 1 | Semana 2 | Semana 3 | Semana 4 |
|-------|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | Diseño e ingeniería | ■ | | | |
| 1.1 | Elaboración de planos y diagramas | ■ | | | |
| 1.2 | Selección de componentes | ■ | | | |
| 1.3 | Diseño lógica de control PLC | ■ | | | |
| 2 | Adquisición de materiales | ■ | ■ | | |
| 2.1 | Investigación y comparación | | ■ | | |
| 2.2 | Órdenes de compra y proveedores | | ■ | | |
| 2.3 | Recepción y verificación | | ■ | | |
| 3 | Instalación | | ■ | ■ | |
| 3.1 | Montaje en gabinete | | | ■ | |
| 3.2 | Instalación panel y batería | | | ■ | |
| 3.3 | Cableado y conexiones | | | ■ | |
| 3.4 | Instalación ánodo y celda | | | ■ | ■ |
| 4 | Programación y puesta en marcha | | | | ■ |
| 4.1 | Programación del PLC | | | | ■ |
| 4.2 | Configuración parámetros PI | | | | ■ |
| 4.3 | Pruebas de funcionamiento | | | | ■ |
| 5 | Pruebas y ajustes | | | | ■ |
| 5.1 | Medición y ajuste potencial | | | | ■ |
| 5.2 | Verificación protecciones | | | | ■ |
| 5.3 | Generación de informes | | | | ■ |

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento para el proyecto

CONCLUSIONES

Este trabajo de título abordó la problemática de la corrosión en gaseoductos, una amenaza constante para la seguridad operativa y la continuidad del suministro de gas natural. Se propuso una solución innovadora y sostenible basada en un sistema automatizado de inyección de corriente de protección catódica, alimentado por energía solar, con el objetivo de superar las limitaciones de los sistemas tradicionales y garantizar una protección más eficiente y duradera de la infraestructura.

El proyecto se centró en el diseño, implementación a futuro y evaluación económica de este sistema automatizado. Se realizó un análisis exhaustivo de los principios de protección catódica, los diferentes tipos de corrosión y los sistemas de protección existentes. Se describió detalladamente el gaseoducto objeto de estudio, ubicado en la región de Valparaíso, Chile, y los desafíos específicos que enfrenta debido a las condiciones del suelo y la presencia de un humedal.

La solución propuesta consiste en un sistema que mide el potencial de la tubería, controla automáticamente la corriente de protección catódica y se alimenta de energía solar almacenada en el bando de baterías. Los componentes clave del sistema incluyen paneles solares monocristalinos, baterías de litio Ferrofosfato, un controlador de carga MPPT, un PLC Siemens Logo 24, un MOSFET para la inyección de corriente, una celda de referencia de cobre-sulfato de cobre y un ánodo de grafito impregnado.

Se realizó un análisis económico comparativo entre el sistema propuesto y las alternativas existentes (ánodos de sacrificio y rectificador de corriente impresa). Los resultados demostraron que el sistema automatizado ofrece una reducción significativa de los costos operativos a largo plazo, principalmente debido a la disminución de los costos de mantenimiento y la optimización del consumo de energía.

El análisis de flujos de caja, realizado bajo tres escenarios estimativos (favorable, neutro y desfavorable), mostró que el proyecto es económicamente viable en todos los casos, con un VAN positivo y una TIR superior a la TMAR del 10%. Con una TIR desde el 52% en el caso más favorable hasta una TIR del 19% en el menos favorable, lo que demuestra la robustez de la

solución propuesta.

La implementación del sistema automatizado de protección catódica no solo ofrece beneficios económicos, sino también operativos y ambientales. Permite un control más preciso del potencial de la tubería, una mayor adaptabilidad a las condiciones variables del suelo. Además, la utilización de energía solar reduce la dependencia de la red eléctrica y disminuye el impacto ambiental.

En conclusión, este proyecto ha demostrado la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema automatizado de inyección de corriente de protección catódica alimentado por energía solar para la protección de gaseoductos. La solución propuesta representa una alternativa eficiente, sostenible y rentable a los sistemas tradicionales, contribuyendo a garantizar la seguridad operativa, la continuidad del suministro de gas natural y la protección del medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

Normas NACE: <https://es.ampp.org/estandares>

Panel solar: <https://www.solarstore.cl/wp-content/uploads/2023/01/PS-310.pdf>

Batería solar: <https://www.solartex.cl/tienda/producto/bateria-de-litio-100ah-12-8-voltios-lifepo4-aokly/>

Controlador de carga: <https://www.solartex.cl/tienda/producto/controlador-solar-mppt-20a-12-24v-tracer2210a/>

Manual PLC Logo 24:

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/461/16527461/att_82567/v1/Logo_s.pdf