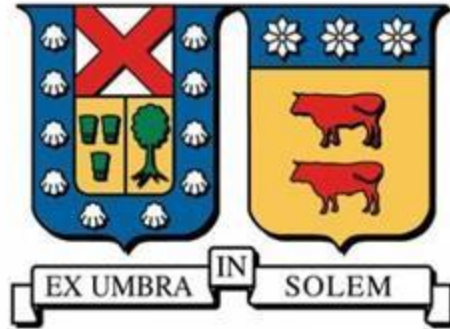


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO - CHILE



ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA DEL REMOLCADOR DE ALTA MAR PEQUÉN DE SAAM

WALDO FABIÁN PÉREZ FREZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
QUÍMICO

Profesor Guía: DRA. ANDREA LAZO

Profesor Co-referente: DRA. PAMELA LAZO

Valparaíso, Abril 2018

Agradecimientos

Para comenzar, quiero agradecer a la profesora Andrea Lazo que ha sido fundamental en mis últimos meses de estancia en la Universidad, tanto como profesora guía y como persona también. Le agradezco el apoyo y la confianza entregada y me gratifico al haber conocido a una persona tan íntegra y bondadosa como usted.

También, quiero dar las gracias a la profesora Pamela Lazo por su buena voluntad, acogida y total disposición para aclarar dudas o prestar ayuda cuando fuese necesario.

No dejo de agradecer también al profesor Adrián Rojo por compartir sus bibliografías, experiencias y conocimientos en el área de corrosión y protección catódica.

De igual modo, quiero agradecer enormemente a mis padres por confiar en mí, inculcarme el valor al estudio y hacerme comprender que el trabajo dignifica al hombre. También agradezco a mis hermanos, abuelos y familiares cercanos por cada palabra de aliento entregada.

Quiero también dar las gracias a mis amigos de la Universidad, a cada uno de ustedes les agradezco cada momento compartido y me llevo los mejores recuerdos conmigo.

Finalmente, agradezco a mis profesores de cátedras y con los cuales tuve el privilegio de compartir como el Profesor J. Yianatos, A. Jaques y C. Caneo.

Resumen

En el siguiente trabajo de título se analiza el actual sistema de protección catódica del Remolcador de Alta Mar Pequeño de la empresa SAAM, correspondiente a ánodos de sacrificio y la factibilidad técnica – económica de la instalación de un sistema de protección catódica por corriente impresa.

En primer lugar, se presenta una breve introducción sobre los actuales problemas que genera la corrosión en los sistemas industriales en particular los marinos y navieros y cómo surge este fenómeno de acuerdo a las reacciones electroquímicas y variables termodinámicas existentes.

De acuerdo a la información proporcionada por la Empresa SAAM S.A. se ilustra la actual situación con el sistema de protección por ánodos de sacrificio y luego, se describe la metodología si se empleara un sistema de protección catódica por corriente impresa. En la primera situación se busca dilucidar las diferencias de masa anódicas teóricas versus las reales que presenta el método de protección catódica por ánodos de sacrificio del actual remolcador y así poder deducir principales factores y fuentes de origen de estas diferencias en los requerimientos mínimos de masa anódica.

En segundo lugar, se describe la metodología del sistema de protección catódica por corriente impresa que se requeriría para el remolcador Pequeño y los equipos para poder implementar dicho sistema. Se evidencian las diferencias existentes entre un sistema y otro, considerando aspectos metodológicos y de eficiencia pues el segundo incluye más factores involucrados en la corrosión tales

como la eficiencia de revestimiento y la velocidad relativa entre la estructura y el medio.

Finalmente, se presenta un estudio económico para evaluar la factibilidad de implementar un sistema de protección catódica por corriente impresa por sobre el sistema de protección catódica actual por ánodos de sacrificio, evaluando distintas aristas económicas tales como la inversión inicial, la mano de obra involucrada y los costos asociados por mantención e instalación. Para este caso se considera una evaluación de 10 años de los métodos de protección por ánodos de sacrificio de material de zinc, por corriente impresa con ánodos de aleación plomo – plata – antimonio y por corriente impresa con ánodos de zinc.

Índice general

Agradecimientos	2
Resumen	3
Índice General	5
Índice de Tablas	6
Índice de Figuras	7
Introducción	8
1. Antecedentes generales	9
2. Información de la Empresa	29
3. Objetivos Generales y Específicos	30
4. Desarrollo Técnico	31
5. Estudio Económico	60
Conclusiones	68
Bibliografía	70
Anexos	72

Índice de tablas

Tabla 1: Serie galvánica práctica en agua de mar	23
Tabla 2: Características electroquímicas relevantes de materiales para ánodos galvánicos.....	24
Tabla 3: Características de los materiales utilizados como ánodos en la protección catódica por corriente impresa.....	27
Tabla 4: Distribución de ánodos RAM Pequén	32
Tabla 5: Composición química de ánodos de sacrificio según casa clasificadora (gr/100 gr de muestra)	33
Tabla 6: Resumen de cálculos para masa anódica según últimos diques del RAM Pequén	35
Tabla 7: Modelos de resistencia anódica	40
Tabla 8: Resistividad del agua de mar en diferentes partes del mundo	42
Tabla 9: Densidades de corriente inicial, final y media para diferentes condiciones climáticas y profundidades (las condiciones climáticas se basan en el rango anual de temperaturas promedio del agua superficial)	47
Tabla 10: Eficiencias medias de diversos tipos de revestimientos	49
Tabla 11: Factor f en función de la velocidad relativa estructura - medio	50
Tabla 12: Cantidad de masa anódica requerida según material de ánodo	56
Tabla 13: Valores normalizados de cable A.W.G.	58
Tabla 14: Costo de materiales y equipos	60
Tabla 15: Depreciación lineal de los equipos	61
Tabla 16: Costos de Instalación	62
Tabla 17: Costos de ingeniería y reingeniería	63
Tabla 18: Costos Fijos	64
Tabla 19: Costos variables	65

Índice de figuras

Figura 1: Celdas (a) Galvánicas y (b)	9
Figura 2: Celda de corrosión simple.....	14
Figura 3: Signos típicos de corrosión en unidades de propulsión y propulsores marinos inferiores, visto fuera de flota.	15
Figura 4: Corrosión en estructura de Hormigón producto de exceso de tensión....	16
Figura 5: Corrosión por grietas	19
Figura 6: Circuito de protección catódica	20
Figura 7: Celda de corrosión galvánica.....	21
Figura 8: Protección catódica por corriente impresa	26
Figura 9: RAM Pequeño.....	31
Figura 10: Metodología para la determinación de cobertura anódica	38
Figura 11: Dimensiones Ánodos RAM Pequeño.....	39
Figura 12: Metodología de diseño para un sistema de corriente impresa.....	45

Introducción

La corrosión es una de las principales problemáticas que experimenta un metal sumergido en un medio líquido y más aún en ambiente marino, ya que éste favorece intrínsecamente la corrosión de los metales.

La corrosión es un problema que afecta a prácticamente toda la flota mundial ocasionando pérdidas de gran magnitud como lo es el caso de Estados Unidos en donde los problemas asociados a la corrosión conllevan pérdidas económicas de alrededor de \$70 mil millones cada año, donde 14 mil millones corresponden a corrosión marina (Virmani).

La corrosión de estructuras marinas puede resultar en fallas prematuras, menor vida útil, mayores costos de mantenimiento y riesgos de seguridad. Para el caso de los buques se propicia la degradación del casco y, por tanto, una disminución del rendimiento del mismo, tanto en su velocidad como en su resistencia estructural.

Los especialistas han avanzado en poder implementar metodologías y prácticas con el fin de mitigar, en parte, la corrosión y en esa misma línea, diseñar sistemas de protección de manera tal de evitar los problemas asociados con ésta. Esto se combate utilizando un conjunto de medios tales como ánodos de sacrificio y corriente impresa, recubrimientos con pinturas y otros aislantes y sistemas de control en el caso de corriente impresa para poder tener un mayor resguardo en la velocidad de corrosión.

1. Antecedentes generales

1.1 Celdas Electroquímicas

La celda o pila electroquímica es un dispositivo que permite la interconversión entre energía química y eléctrica. Existen dos clases de celdas: las galvánicas y electrolíticas. Una celda galvánica es aquella en que las reacciones se producen espontáneamente en los electrodos cuando están conectados por un conductor sin necesidad de imponer un voltaje externo y se emplean a menudo para convertir la energía química en energía eléctrica. En la Figura 1.a se ilustra una celda galvánica para el par Zn/Cu^{2+} . Por otro lado, una celda electrolítica es aquella en la que las reacciones se efectúan mediante la imposición de un voltaje externo mayor que el potencial en circuito abierto de la celda¹. La Figura 1.b representa una celda electrolítica para el par electroquímico de $\text{Cu}^{2+}/\text{H}_2\text{O}$.

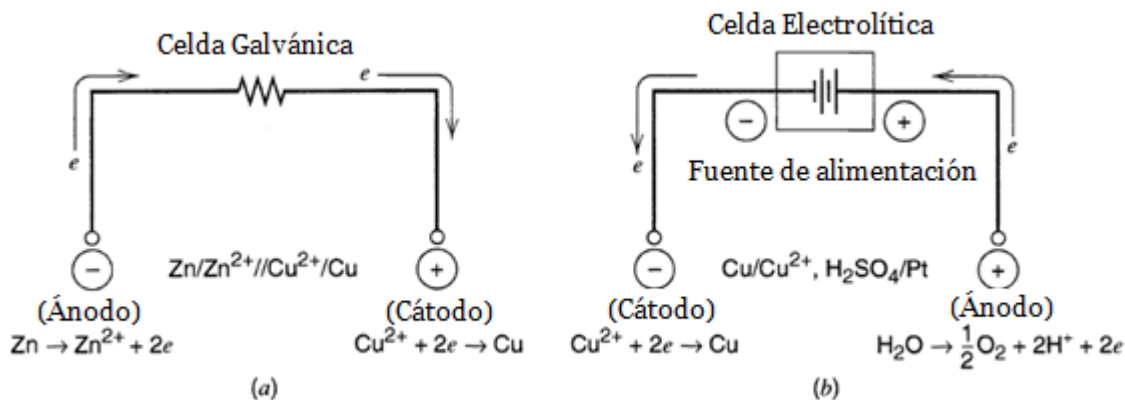
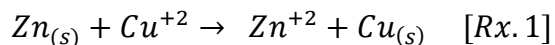


Figura 1: Celdas (a) Galvánicas y (b) Electrolíticas (Bard & Faulkner, 2001)

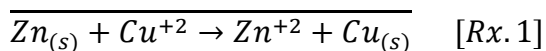
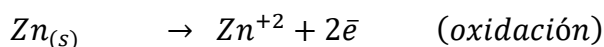
¹ El potencial en circuito abierto de la celda corresponde al máximo valor de tensión entre los terminales de la celda sin que estén conectados a carga.

Para la Celda Galvánica (Figura 1.a) se considera la reacción redox:



La Rx.1 ejemplifica una reacción espontánea, que se puede demostrar al colocar una barra de zinc en una solución de sulfato de cobre, la cual, al ser introducida en solución, comienza a formar de manera inmediata una película de cobre metálico.

En esta reacción que representa una pila galvánica correspondiente al par Zn/Cu⁺², el Zn se oxida de forma espontánea en Zn⁺² y de igual modo el Cu⁺² se reduce a Cu:



La reacción 1 tiene una espontaneidad que surge a partir de una explicación termodinámica de acuerdo a las especies que se vean involucradas en la reacción.

1.2 Ecuación de Nernst: El voltaje en función de la concentración

El voltaje producido en una celda galvánica depende de las concentraciones de reactivos y productos (o de manera más rigurosa de sus actividades) que se encuentran relacionados directamente a través de la Ecuación de Nernst.

La Energía libre de Gibbs permite predecir la espontaneidad de una reacción. Para condiciones estándar (T = 25°C, P = 1 atm) es posible encontrar esta información tabulada para una amplia gama de especies y para el caso particular

de una reacción redox se determina una variante que comúnmente se expresa como energía libre de Gibbs (ΔG°). En el caso de la Rx.1 su energía libre (ΔG°) es igual a -212 [kJ], valor que al ser menor a 0 indica la naturaleza espontánea de la reacción.

A menudo, las reacciones químicas no se presentan en condiciones estándar, pero es posible estimar su espontaneidad a partir de una relación que involucre su condición en estado estándar y las condiciones experimentales tal como lo expresa la siguiente identidad:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q \quad [ec. 1]$$

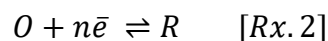
en que R representa la constante de los gases ideales, T la temperatura del sistema y Q el cociente de reacción.

La energía libre también se puede sobreentender como la disminución del trabajo eléctrico realizado por la celda, que matemáticamente queda determinado de la forma:

$$\Delta G = -nFE \quad [ec. 2]$$

siendo E el voltaje de la pila, n los moles transferidos y F la constante de Faraday.

La constante de Faraday surge a partir de un balance general de masa, tal como se aprecia en la Rx.2 que ilustra una reacción simple de transferencia de electrones:



En esta reacción de reducción de O en R, para reducir 1 mol de O se necesitan n electrones obteniendo 1 mol de R, por lo que la constante de Faraday va a representar la carga de un mol de electrones, es decir:

$$F = N^{\circ}_{avogadro} \cdot Q_{electrón} \text{ [ec. 3]}$$

$$F = 6,02 \cdot 10^{23} \left[\frac{\text{electrones}}{\text{mol}} \right] \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \left[\frac{\text{Coulomb}}{\text{electrón}} \right] = 96.485 \left[\frac{\text{Coulomb}}{\text{mol}} \right]$$

Teniendo en cuenta la analogía presentada anteriormente es que se puede reescribir la ec.1 de la siguiente manera:

$$E = E^{\circ} + \frac{2,3RT}{nF} \log \frac{c_O}{c_R} \text{ [ec. 4]}$$

donde c_O y c_R representan las concentraciones del par O/R y E° su potencial inicial estándar.

Finalmente, esta ecuación atribuida al científico Walter Nernst para una temperatura de 25°C puede representarse como:

$$E = E^{\circ} - \frac{0,0592}{n} \log \frac{c_O}{c_R} \text{ [ec. 5]}$$

La ecuación de Nernst permite calcular el voltaje producido por cualquier pila, conociendo los valores de sus potenciales iniciales estándar (E°) de sus electrodos y las concentraciones apropiadas.

1.3 Corrosión y celda de corrosión

La corrosión es un proceso natural que como todo proceso tiende a alcanzar el estado de menor energía y se puede definir como el deterioro de las propiedades de un material debido a interacciones con su medio.

La corrosión electroquímica involucra la transferencia de electrones a través de una interfase metal/electrolito produciéndose una celda constituida por 4 elementos o partes:

- Ánodo (donde ocurre la oxidación del metal)
- Cátodo (donde ocurre la reducción de una especie diferente).
- Electrolito, para la conducción iónica entre los dos sitios de reacción.
- Conexión metálica, para la conducción de electrones entre los dos sitios de reacción.

Los electrones generados en la formación de iones metálicos en el ánodo pasan a través de la conexión metálica a la superficie de las áreas catódicas inmersas en el electrolito. El balance eléctrico del sistema se restablece cuando los electrones reaccionan con ciertos iones positivos presentes en el electrolito.

En la Figura 2 se puede apreciar una celda de corrosión simple:

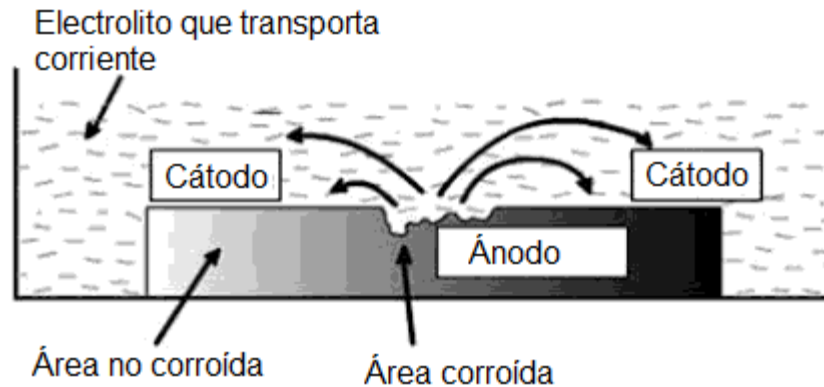


Figura 2: Celda de corrosión simple. (Ahmad, 2006)

1.4 Corrosión marina

La corrosión marina es el deterioro del metal en el medio ambiente marino debido a diversos procesos como las reacciones electroquímicas. Las estructuras que se ven principalmente afectadas son:

1. Sistemas de transporte marítimo
2. Instalaciones de exploración de petróleo
3. Puertos
4. Monumentos erigidos en el mar

En el caso de los sistemas mencionados anteriormente usados en servicio de agua salada, se sabe que éstos están expuestos a diferentes ataques destructivos. Aquí, el término corrosión acuosa toma importancia vital ya que describe la mayor parte de aquellos problemas encontrados cuando una estructura está en contacto con agua de mar, sin embargo, tanto la corrosión atmosférica de los metales expuestos sobre o cerca de las costas, la corrosión por sales calientes

en motores operando en el mar o en contacto con aire marino son igual de problemáticos.

Algunos tipos de corrosión típicas en medio marino son:

- *Corrosión galvánica:* es la corrosión más generalizada en los ambientes marinos, que aparece como una capa continua de corrosión sobre toda una superficie y ocurre más a menudo en los objetos expuestos al aire y no cuando los objetos están totalmente sumergidos en el agua.

La Figura 3 ilustra un sistema de propulsión afectado por corrosión galvánica:



Figura 3: Signos típicos de corrosión en unidades de propulsión y propulsores marinos inferiores, visto fuera de flota. (Kulkarni, 2011)

- *Corrosión intergranular*: es una forma microscópica de corrosión causada por la diferencia de potencial entre los límites de grano² del metal y los cuerpos de grano³.
- *Fisuración por corrosión bajo tensión (SCC)*: corrosión que puede ocurrir cuando el sistema desarrolla grietas muy pequeñas al estar bajo tensión por tracción.

En la Figura 4 se puede apreciar una estructura de hormigón afectada por corrosión bajo tensión:



Figura 4: Corrosión en estructura de Hormigón producto de exceso de tensión
(Martínez, 2014)

² Límite de grano: es una zona angosta de separación entre dos cristales de un mismo grano policristal.

³ Cuerpos de grano: es la estructura cristalina de los materiales a un nivel microscópico.

- *Corrosión por grietas (crevice corrosion)*: corrosión que ocurre de forma localizada en grietas o hendiduras como, por ejemplo, dentro de juntas dobladas, dentro de cojinetes, bajo organismos porosos y bajo depósitos porosos.
- *Corrosión por erosión*: corrosión que combina el ataque de un agente externo (condiciones marinas) y la abrasión mecánica o desgaste y que como consecuencia del movimiento de un fluido genera corrosión por erosión.

Dentro de los principales factores ambientales que afectan la corrosión marina se encuentran:

- *Temperatura del aire*: destaca como uno de los factores más importantes, que al experimentar cambios bruscos produce efectos bastante pronunciados. Además de la temperatura del aire, la temperatura real en la superficie metálica puede proporcionar información sobre la cinética del proceso de corrosión.
- *Tiempo de humedad (TOW)*: corresponde al tiempo durante el cual la superficie metálica está cubierta con una delgada capa de electrolito. Este tiempo determina la duración del proceso de corrosión.
- *Humedad relativa del aire (HR)*: es un factor muy importante. La combinación de temperatura y humedad relativa se describe como complejo temperatura – humedad relativa (complejo T – RH). Según

la norma ISO 9223 – 2012⁴ el complejo T – RH puede usarse para calcular el tiempo de humedad (TOW).

- *Depósitos de sal de mar:* disminuyen las posibles propiedades protectoras de los productos de corrosión formados sobre la superficie metálica y actúan como centros de condensación del vapor de agua que facilitan las reacciones electroquímicas. En el caso del agua de mar, los iones cloruro destruyen fácilmente la película de óxido formada sobre la superficie de acero al carbono.

Adicionalmente, el oxígeno, siempre presente en atmósferas marinas, el spray salino y las zonas de oleaje aumentan el ataque de la sal o del ion cloruro. La diferencia de concentración de oxígeno (presente en la línea de flotación o en una gota de spray salino) genera una celda electroquímica en la cual el ataque se concentra donde hay menor concentración de oxígeno, formando grietas que permiten el ingreso de agua y de iones cloruro que excluyen al oxígeno. De esta manera, se forman zonas que se vuelven rápidamente anódicas y ácidas generando puntos propicios para el inicio de la corrosión.

⁴ La Norma ISO 9223:2012 establece un sistema de clasificación para la corrosión de ambientes atmosféricos. De tal modo, especifica los factores claves en la corrosión atmosférica de metales y aleaciones. Estos son el complejo temperatura – humedad, la contaminación por dióxido de azufre y salinidad en el aire.

La Figura 5 ejemplifica lo anterior para el caso de la corrosión por grietas:

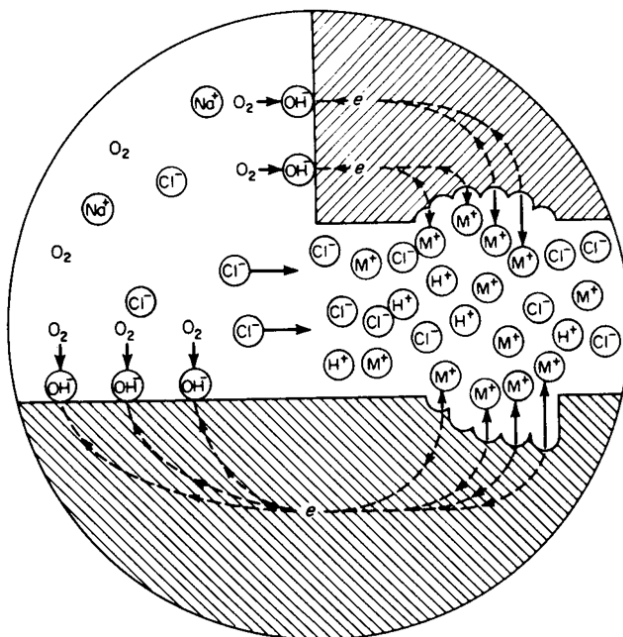


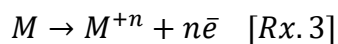
Figura 5: Corrosión por grietas (Fontana, 1987)

1.5 Protección Catódica

La corrosión se puede sobreentender como el resultado de una reacción electroquímica que se produce por una diferencia de potencial entre ánodo y cátodo. Cuando dos metales se ponen en contacto, uno de ellos (el más noble) tenderá a aceptar electrones del otro (el menos noble), hasta que la diferencia de potencial establecida por la transferencia sea suficiente para oponerse al paso de electrones a través de la superficie de contacto.

El concepto de Protección Catódica involucra reducir a cero esta diferencia de potencial entre los sitios anódicos y catódicos locales, dando como resultado un

flujo nulo de corriente de corrosión (NACE, 2004). Lo anterior debido a que la corrosión electroquímica tiene sólo lugar en el ánodo de la pila de corrosión y por ello, la forma más eficaz de evitar la corrosión de una superficie es conseguir que ésta se comporte como cátodo. Teniendo la reacción de oxidación:



será necesario aportar una cantidad suficiente de carga negativa, para que el equilibrio de la reacción se desplace en sentido contrario.

Luego, la protección catódica se clasifica en activa o pasiva y generalmente se utiliza conjugada con pinturas y revestimientos. En la Figura 6 se presenta un circuito de protección catódica:

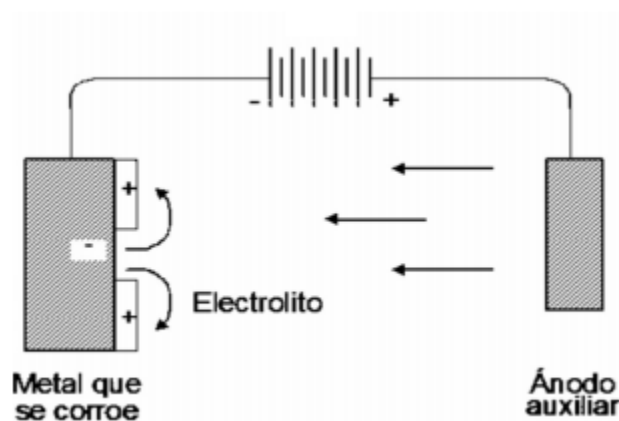


Figura 6: Circuito de protección catódica (Smith, 2014)

1.5.1 Protección catódica pasiva por medio de ánodos de sacrificio

La protección catódica opera bajo el principio de que un metal más activo conectado a un metal menos activo formará una celda de corrosión galvánica. Ésta se usa para proteger al metal menos activo. El metal más activo se corroerá (se sacrificará), por lo tanto, estos ánodos se denominan *ánodos de sacrificio*.

En la Figura 7 se ilustra una celda de corrosión galvánica:

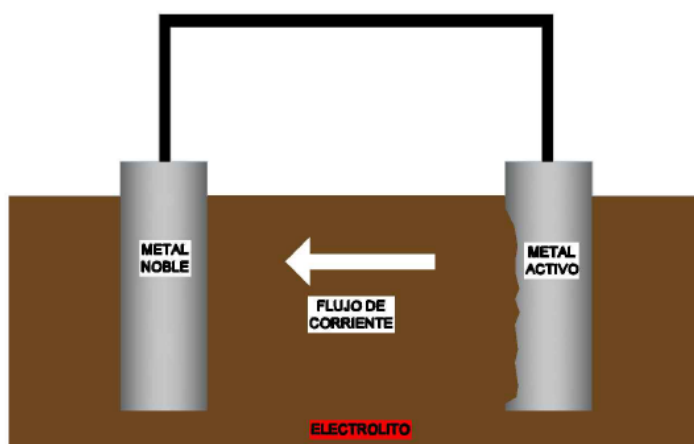


Figura 7: Celda de corrosión galvánica (NACE, 2004)

Para que un material pueda utilizarse como ánodo de sacrificio se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. Su potencial debe ser más electronegativo como ánodo que el del metal a proteger.
2. La intensidad de corriente que se establece en la pila formada no debe ser muy alta (ya que esto disminuirá el tiempo de vida útil del ánodo), por

lo que el potencial electronegativo del ánodo de sacrificio no puede exceder en mucho al del metal a proteger.

3. Debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, no debe desarrollar películas pasivantes protectoras y debe tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
4. El metal debe tener un elevado rendimiento eléctrico, expresando en amperes – hora por kg [A·h/kg] lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente (consumo de corriente).
5. La disolución del ánodo debe ser uniforme.
6. El metal debe ser de fácil adquisición y deberá de poderse fundir en diferentes formas y tamaños.
7. El metal deberá tener un costo razonable, de modo que, en conjunción con las características electroquímicas correctas, pueda lograrse una protección a un costo bajo por ampere – año.

La serie galvánica de metales práctica (Tabla 1) muestra 3 metales y una aleación más activa que el fierro. (Nota: una completa serie de fuerza electromotriz (fem) o serie galvánica mostrará otros metales más activos que el fierro, sin embargo, éstos 3 son los más efectivos). Los metales más activos usados como ánodos para proteger aleaciones de fierro, cobre y plomo son las aleaciones de magnesio, zinc y aluminio.

Tabla 1: Serie galvánica práctica en agua de mar. (NACE, 2004)

Metal	Volts vs. Ag/AgCl ⁵
	Activo o extremo anódico
Magnesio	-1,55 a -1,70
Zinc	-1,05
Aluminio	-1,00
Acero al carbono limpio	-0,45 a -0,75
Acero al carbono oxidado	-0,15 a -0,45
Fierro dúctil/fundido	-0,45
Plomo	-0,45
Acero en concreto	-0,15
Cobre	-0,15
Fierro alto en silicio	-0,15
Carbón, grafito	+0,35
	Noble o extremo catódico

Debido a que los ánodos se disuelven en agua de mar, éstos deben ser reemplazados a intervalos regulares de tiempo, en promedio cada 2 – 2,5 años, cuando aproximadamente un 15% del peso original aún permanece.

La elección del ánodo se basa en aspectos económicos y de desempeño. Las consideraciones económicas en la elección del metal para un ánodo galvánico

⁵ Potencial de Ag/AgCl en KCl (3M) vs NHE a 25°C igual a 0,210 [V].

están basadas no sólo en la cantidad teórica de corriente generada por kilogramo de ánodo corroído, sino también en la eficiencia de esta corrosión en términos de cantidad de metal corroído que aparece como corriente útil en el circuito externo.

De acuerdo a lo anterior, la Tabla 2 compara 3 materiales típicos para construcción de ánodos galvánicos de acuerdo a su desempeño y eficiencia:

Tabla 2: Características electroquímicas relevantes de materiales para ánodos galvánicos. (Gómez de León & Alcaraz, 2004)

Características	Aluminio	Zinc	Magnesio
Suministro teórico de corriente [A·h/kg]	2.976	820	2.198
Suministro real de corriente [A·h/kg]	2.400 – 2.800	780	1.050 – 1.250
Rendimiento [%]	80 – 95	95	47 – 57
Consumo [kg/A·año]	2,94	10,64	3,98

Para poder determinar el mínimo número teórico de ánodos que se deben instalar se utiliza la siguiente expresión:

$$M = \frac{A \cdot j}{1.000} \cdot t \cdot a_m \quad [ec. 6]$$

Donde:

- M: cantidad de material de ánodos que se corroen en tiempo t [kg]
- A: superficie mojada [m²]
- j: densidad de corriente eléctrica requerida [mA/m²]

- ϵ : capacidad eléctrica del ánodo en agua de mar [Ah/kg]
- u : factor de utilización para cálculo de emisiones ($u = 1$).
- a_m : fracción del material anódico usado en relación a uso total de ánodos.

1.5.2 Protección catódica activa por medio de corriente impresa

El sistema de corriente impresa desplaza potenciales para proteger el metal. Los componentes de un sistema de protección catódica por corriente impresa son: ánodos, relleno del ánodo, una fuente de alimentación de energía (rectificador), la estructura, cables y conexiones.

El procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) y el positivo con un ánodo auxiliar que cierra el circuito. Es indispensable la existencia del electrolito (medio agresivo) que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico.

La Figura 8 representa esquemáticamente el sistema de protección catódica por corriente impresa.

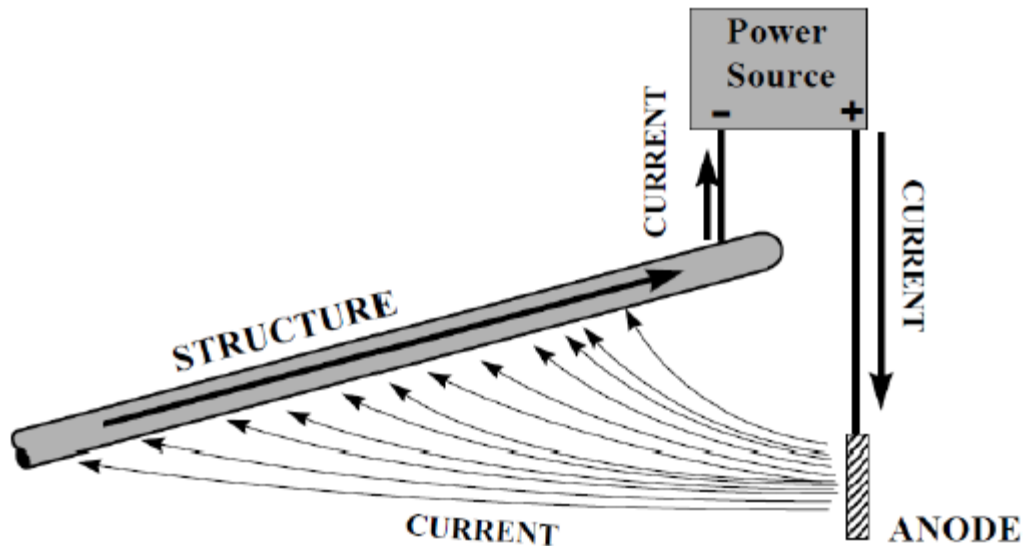


Figura 8: Protección catódica por corriente impresa (NACE, 2004)

Teóricamente, un sistema de corriente impresa podría ser usado para proteger el exterior completo de un casco, pero en la práctica este sistema es frecuentemente usado en combinación con ánodos de sacrificio. Las partes del casco con los ánodos pasivos son el túnel propulsor de la proa, el propulsor y el timón. Estas partes requieren un mayor nivel de protección, ya que usan metal no terminado, el recubrimiento de estas partes debe tener mayor factor de ruptura y la velocidad del agua que pasa a lo largo de estas secciones es mayor en comparación a otras del mismo barco.

Los ánodos que se usan en los sistemas de protección catódica por corriente impresa son diferentes a los usados en sistemas galvánicos. Los ánodos de corriente impresa son fabricados de materiales que se consumen a bajas velocidades. Estos, deben tener una serie de propiedades como: buena conductividad eléctrica, baja tasa de corrosión, propiedades mecánicas apropiadas,

fabricados fácilmente en variedad de formas, bajo costo, capaces de soportar las altas densidades de corriente en su superficie sin formar barreras de óxidos protectores, entre otras.

Los materiales típicamente usados son magnetita, materiales en base al carbono como grafito, acero con alto contenido de silicio (14 – 18%), plomo / óxido de plomo, aleaciones de plomo, materiales del grupo platino (tantalio, niobio, titanio), siendo el platino el material ideal por su alta resistencia a la corrosión, pero siendo altamente desventajoso su costo que hace su uso inviable.

A continuación, la Tabla 3 presenta características de materiales de ánodos utilizados en sistemas de corriente impresa y los medios en los que son comúnmente aplicados:

Tabla 3: Características de los materiales utilizados como ánodos en la protección catódica por corriente impresa. (Gonzalez, 1989)

Material	Densidades de corriente [A/m ²]	Consumo [kg/A·año]	Aplicaciones
Grafito	2,5 – 10	0,1 – 2	Suelos y aguas dulces
Chatarra de Fierro	5 – 50	9,1	Suelos, aguas dulces y de mar.
Ferrosilicio	5 – 50	0,23	Suelos, aguas dulces y de mar.
Pb – 2% Ag	300	0,09	Agua de mar.
Ti platinado	500 – 700	despreciable	Agua de mar.

En la práctica, son posibles voltajes sobre 100 [V] y altas densidades de corriente en ánodos para corriente impresa. Así, grandes áreas de estructuras pueden ser protegidas por un solo ánodo debido al voltaje aplicado siendo posible también colocar el ánodo en una parte lejana a la estructura.

Por otro lado, el plan de colocación de ánodos o plan de protección catódica para los barcos toma en cuenta una serie de factores tales como la susceptibilidad a la corrosión del casco de acuerdo a los tipos de éste y las partes individuales del barco. Las áreas alrededor del propulsor y timón por ejemplo tienen más ánodos colocados que el resto del barco.

2. Información de la Empresa

SAAM es una empresa multinacional de origen chileno que presta servicios al comercio internacional a través de sus tres divisiones de negocios: Terminales Portuarios, Remolcadores y Logística. Constituye el principal activo de la Sociedad Matriz SAAM S.A., la cual es una sociedad anónima abierta constituida en el año 2011 y cuyas acciones se cotizan en la Bolsa de Comercio de Santiago de Chile, formando parte del IPSA (Índice de Precios Selectivo de Acciones) que reúne las 40 principales empresas del país.

Actualmente SAAM es uno de los principales operadores portuarios de América, líder en servicios de remolcadores en el continente y cuarto a nivel mundial. Cuenta con más de 50 años de experiencia, está presente en 13 países del Norte, Centro y Sur de América, generando empleo a más de 40 mil trabajadores.

En los distintos mercados donde opera, SAAM está asociado a operadores locales y globales estratégicos. Entre ellos destacan SSA Marine, el mayor operador de terminales en EE.UU. y SMIT, segundo mayor operador de remolcadores del mundo y filial del grupo holandés Boskalis y American Airlines.

3. Objetivos Generales

- Estudio Técnico - Económico del actual sistema de protección catódica del remolcador de alta mar Pequén de la empresa SAAM.
- Estudio Técnico – Económico de la implementación del sistema de protección catódica por corriente impresa en el remolcador de alta mar Pequén.

3.1 Objetivos Específicos

- Realizar en base a información proporcionada el análisis del sistema actual de protección catódica por ánodos de sacrificio.
- Estudiar técnicamente los sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio y por corriente impresa para el remolcador de alta mar Pequén.
- Realizar análisis técnico y económico para evaluar factibilidad de implementar el sistema de protección por corriente impresa en el remolcador de alta mar Pequén.

4. Desarrollo Técnico

4.1 Remolcador de alta mar Pequén

El remolcador de alta mar Pequén (RAM Pequén) fue fabricado el año 2001 en el astillero Xuexin Shipyard Guangzhou de la República Popular China. Sus dimensiones son 30,5 [m] de eslora, 9,8 [m] de manga, 3,5 [m] de calado medio, 4,5 [m] de puntal con un TRG de 316 toneladas.

Cuenta con 2 motores Caterpillar 3.516 B con una potencia total de 400 [BHP].

En la Figura 9 se presenta una fotografía del RAM Pequén.

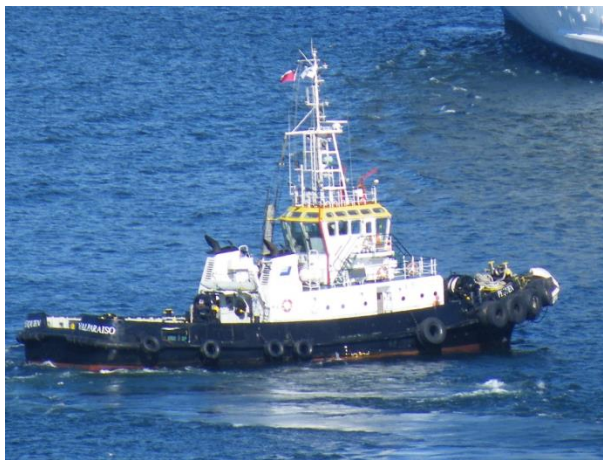


Figura 9: RAM Pequén

El sistema de protección catódica que utiliza el RAM Pequén es por ánodos galvánicos de zinc, que consiste en la distribución de 37 ánodos de 28 [kg] cada uno, es decir, una masa anódica de 1.036 [kg].

El esquema de pintura del RAM Pequeño, según información proporcionada por la empresa, de abril de 2017, consta de la aplicación de tres pinturas Bannoh 500 (seco 200 micrones), Bannoh 1.500 (seco 195 micrones) y A/F Sea Grand Prix 660 (seco 224 micrones) para la obra viva que corresponde a 520 [m²]. La obra muerta corresponde a 176 [m²] y su esquema de pintura consta de Bannhof 500 (seco 160 micrones), Bannhof 1.500 (seco 156 micrones) y Acri 700 (seco 135 micrones).

La Tabla 4 muestra la distribución de ánodos para el RAM Pequeño los cuales se sueldan a la estructura.

Tabla 4: Distribución de ánodos RAM Pequeño (SOCIBER, 2015)

Descripción	Cantidad Babor	Cantidad Estribor	Unión
Tobera	8	8	Soldados
Quilla de Rolido	4	4	Soldados
Casco	4	4	Soldados
Caja de Mar	1	2	Soldados
Quillote	1	1	Soldados
Total	18	19	37

4.2 Análisis de la situación actual

El análisis que se presenta a continuación es respecto al actual sistema de protección catódica que presenta el remolcador de Alta Mar Pequeño que es por medio de ánodos de sacrificio.

Previo a desarrollar el estudio técnico sobre el sistema de protección catódica del RAM Pequén, a través del Departamento de Química de la Universidad Técnica Federico Santa María se verificó la información proporcionada por la casa clasificadora que utiliza SAAM en la que constata la composición química de los ánodos galvánicos que se detallan en la presente Tabla:

Tabla 5: Composición química de ánodos de sacrificio según casa clasificadora (gr/100 gr de muestra) (SOCOMET, 2017)

Serie	Al	Mn	Fe	Cu	Sn	Mg	Si	Pb	Cd	Zn
ZN-2384	0,27	0,001	<0,005	<0,002	0,001	0,001	0,09	<0,005	0,11	Resto
ZN-2385	0,28	0,001	<0,005	<0,002	0,001	0,001	0,09	<0,005	0,13	Resto

A su vez, en el Anexo A se presenta el análisis de respaldo que emitió el Departamento de Química de la Universidad Técnica Federico Santa María.

La casa clasificadora con la que trabaja SAAM es ABS Américas, quienes utilizan la siguiente fórmula para calcular la cantidad teórica de masa anódica:

$$K = \frac{A \cdot j \cdot P}{Q} \quad [ec. 7]$$

En la expresión A corresponde al área en $[m^2]$ de superficie de obra viva, j la densidad de corriente que para ABS Américas es un valor constante igual a 0,015 $[A/m^2]$, P es el tiempo de activación, que usualmente son 36 meses y Q la constante anódica del zinc equivalente a 780 $[A \cdot h/kg]$.

El cálculo de masa anódica teórica para el cambio de ánodos realizado entre mayo de 2012 y mayo de 2015 (36 meses) arroja lo siguiente:

$$K = \frac{520[m^2] \cdot 0,015 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 36[meses] \cdot 30 \left[\frac{días}{mes} \right] \cdot 24[horas/día]}{780[A \cdot h/kg]} = 259,2 [kg]$$

Es decir, la masa anódica realmente colocada es aproximadamente 4 veces la masa teórica, sin embargo, el consumo real reportado fue del 80% equivalente a un 828,8 [kg] de zinc.

Para el último dique realizado entre mayo de 2015 y abril de 2017 (25 meses), se obtuvo la siguiente masa anódica:

$$K = \frac{520[m^2] \cdot 0,015 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 25[meses] \cdot 30 \left[\frac{días}{mes} \right] \cdot 24[horas/día]}{780[A \cdot h/kg]} = 180 [kg]$$

Como se desprende, el consumo teórico en estos 25 meses considerando sólo la obra viva es de 180 [kg], sin embargo, se consumieron 621,6 [kg], es decir, 3,5 veces lo indicado por la casa clasificadora.

Realizando el cálculo considerando obra viva y obra muerta, el consumo en los 25 meses sería de 241 [kg] correspondiente a 2,6 veces lo indicado por la casa clasificadora.

En síntesis, la Tabla 6 permite dilucidar de mejor manera la analogía presentada para el cálculo de masa anódica para el RAM Pequeño.

Tabla 6: Resumen de cálculos para masa anódica según últimos diques del RAM

Pequén (Fuente: Elaboración propia)

Fecha	Meses	Consumo teórico [kg]	Consumo real [kg]	$\frac{\text{Masa anódica real}}{\text{Masa anódica teórica}}$
05/2012 – 05/2015	36	259,2	828,8	4,0
05/2015 – 04/2017	25	180	621,6	3,5

4.3 Causas de aumento en consumo anódico

Tal como denotan los cálculos anteriores, existe en la práctica un consumo anódico excesivo respecto a lo que estipula la teoría. A continuación, se presentan las causas que pueden estar asociadas a las fallas en el actual sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio:

1. Las capas de pinturas no son totalmente impermeables, presentando porosidades y defectos en la superficie, que atrapan el agua y resultan ser un foco de corrosión.
2. Las uniones soldadas, chapas de flotación y fondos de proa, son irregularidades que también benefician al proceso corrosivo.
3. Pilas locales de corrosión (se forman cuando un metal se encuentra a distintas temperaturas a lo largo de su superficie, creándose una diferencia de potencial).

4. Fenómenos de cavitación producidos por la hélice, que favorecen la degradación del metal y el ataque corrosivo.
5. Roces de cadenas producidos por el ancla.
6. Roces del costado del buque con los muelles que elimina la capa de pintura protectora y exponen el metal.
7. Zonas sin pintar, debido a su inaccesibilidad en la etapa de pintado (por ejemplo, picaderos de apoyo del buque en dique).
8. Baja calidad de las capas de pintura o aplicación incorrecta.
9. Corrosión electrolítica producto de fuga de corriente a través del casco.
10. Inducción de corriente sobre el casco producido desde un muelle con partes o componentes metálicos, un barco vecino o la marina en el que se encuentre amarrado. Normalmente estos sitios disponen de servicios de luz o de equipos eléctricos que pueden tener pérdidas en su recorrido y con fugas de corriente muy difíciles de detectar, por esta causa tienen una adecuada puesta a tierra.
11. Flujo de corrientes parásitas o inversión de la polaridad en un barco vecino. Esto provoca efectos en el casco del sistema.
12. Incorrecta distribución de los ánodos lo que conlleva a mala repartición de corriente en la estructura.

Es muy probable que el actual sistema de protección catódica del RAM Pequéen esté siendo afectado por varias de las causas mencionadas anteriormente en que principalmente destacan: fuentes de corrientes de fuga, mala aislación de los equipos eléctricos y sus conexiones, y problemas con el revestimiento y pintura

del buque. Esto basado en que un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio a diferencia de uno de corriente impresa tiene más probabilidades de verse afectado por corrientes de fuga, dado que principalmente un sistema de protección por corriente impresa comienza el circuito con una fuente de alimentación (rectificador) y lo termina con un ánodo inerte. Además, las aislaciones de los artefactos eléctricos pertenecientes a la nave no están contemplados como parte del diseño de protección catódica por ánodos de sacrificio, siendo una principal fuente de corrientes de fuga y, por ende, de corrosión.

Finalmente, los problemas asociados al esquema de pintura y revestimiento del buque también son una causa principal de la falla del actual sistema de protección, puesto a que puede existir formación de huecos por la pérdida rápida de solvente en una pintura aplicada por aspersión, presencia de agua en las pinturas, daños en la película de pintura y revestimiento y aplicación de materiales de alto espesor en una zona de menor espesor recomendado. Adicionalmente, puede existir mala adherencia (desconchamiento) por contaminación de la superficie, fallas en el secamiento, presencia de burbujas por pintar sobre sustratos porosos y también existe la posibilidad de que ocurra decoloración sulfhídrica causada por la reacción del sulfuro de hidrógeno en el aire con los pigmentos de plomo y los secadores en la pintura.

4.4 Cálculo de la cobertura Anódica

4.4.1 Descripción de la Metodología

Para obtener la cobertura anódica por el sistema de ánodos de sacrificio se emplea la siguiente metodología:

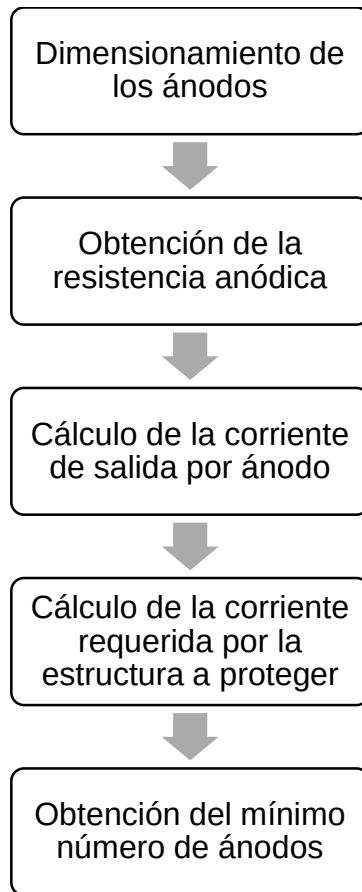


Figura 10: Metodología para la determinación de cobertura anódica (Fuente:
Elaboración Propia)

4.4.2 Dimensionamiento de los ánodos

En la Figura 11 se presentan las dimensiones de los ánodos de bloque que utiliza SAAM:

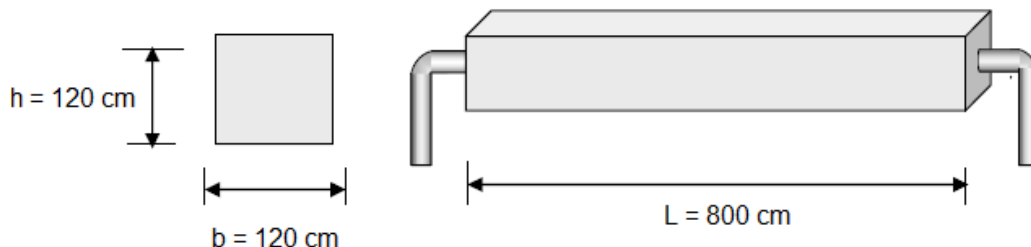


Figura 11: Dimensiones Ánodos RAM Pequeño (Fuente: Elaboración propia)

4.4.3 Obtención de la resistencia anódica

La forma de obtener la corriente de salida por cada ánodo es a partir de la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R_A} \quad [ec. 8]$$

en que V corresponde al potencial y R_A la resistencia del ánodo.

En la Tabla 7 se presentan los modelos que comúnmente se utilizan para calcular la resistencia de los ánodos:

Tabla 7: Modelos de resistencia anódica (Det Norske Veritas, 2010)

Modelo	Fórmula
Modificada de Dwight	$R_A = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln \left(\frac{4L}{r} \right) - 1 \right)$
McCoy	$R_A = \frac{0,315\rho}{\sqrt{A_e}}$
Waldron y Peterson	$R_A = \frac{\rho}{0,58 \cdot A_e^{0,727}}$
Lloyd's	$R_A = \frac{\rho}{2 \cdot S}$

donde:

- R_A : resistencia del ánodo [Ω]
- ρ : resistividad del material al agua de mar [$\Omega \cdot \text{cm}$]
- r : radio equivalente del ánodo para formas diferentes a la cilíndrica, donde $r = P/2\pi$ y P es el perímetro de la sección transversal. [cm]
- A_e : Área de la superficie expuesta del ánodo [cm^2]
- L : longitud del ánodo [cm]
- S : media aritmética de la longitud y ancho del ánodo [cm].

Para tener una mayor claridad al momento de seleccionar el modelo de resistencia anódica se adjunta a continuación un breve detalle de cada uno:

- **Ecuación modificada de Dwight:** es la más utilizada para el ánodo tipo barra o ánodos delgados (de sección transversal rectangular o trapezoidal), libremente suspendidos o separados de plataforma, sin

embargo, se puede aplicar para ánodos montados apoyados al mismo nivel de la superficie a proteger.

- **Ecuación de McCoy:** fue expuesta para determinar la resistencia del ánodo basado en la superficie expuesta y sin considerar la forma geométrica. Se recomienda para ánodos tipo brazaletes, también se aplica en ánodos montados al mismo nivel de la superficie a proteger y en ánodos que se aproximan a la forma cilíndrica.
- **Ecuación de Waldron y Peterson:** se utiliza para ánodos rectangulares y planos con respaldo de madera, brazaletes seccionados sobre línea de tubos y estructuras.
- **Fórmula de Lloyd's:** ha sido propuesta para el tipo de ánodo de placa delgada expuesta por un solo lado, aunque puede aplicarse a brazaletes y montados al mismo nivel de la superficie a proteger.

El potencial está determinado de acuerdo al tipo de ánodo, mientras que para la resistencia se utiliza la ec. de Lloyds, pues dicho modelo encasilla la geometría de ánodos de bloques presentados en el punto 4.4.2. Así, la resistencia anódica queda determinada por:

$$R_A = \frac{\rho}{2S} \quad [ec. 9]$$

La media S para el caso de los ánodos del RAM Pequeño es:

$$S = \frac{(120 + 800)[cm]}{2} = 460 [cm]$$

así, se desea buscar la resistencia del ánodo que como lo detalla la [ec.9] utiliza la resistividad eléctrica del material al agua de mar que para el caso del RAM Pequeño es un valor cercano a 24 [$\Omega \cdot \text{cm}$], debido a las semejanzas climáticas entre las costas peruanas y las costas chilenas. El detalle se presenta a continuación en la Tabla 8:

Tabla 8: Resistividad del agua de mar en diferentes partes del mundo (Rosario Francia, 2004)

Lugar	Resistividad (ρ) [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
Golfo de México	20	22
Costa Oeste U.S.	24	15
Mar del Norte	26 – 33	0 – 12
Golfo Pérsico	15	30
Indonesia	19	24
Perú – Costa Sur	24	18

Luego, la resistencia según el modelo de Lloyds es:

$$R_A = \frac{24 [\Omega \cdot \text{cm}]}{2 \cdot 460 [\text{cm}]} = 2,6 \cdot 10^{-2} [\Omega]$$

4.4.4 Cálculo de la corriente de salida por ánodo

Es importante destacar que el voltaje utilizado corresponde a la diferencia de potencial entre el zinc (material del ánodo) y el acero desnudo en agua de mar.

Utilizando la Ley de Ohm:

$$I = \frac{-0,8 - (-1,05) [V]}{2,6 \cdot 10^{-2} [\Omega]} = 9,62 [A]$$

Luego, la corriente de salida por ánodo es de 9,62 [A].

4.4.5 Cálculo de la corriente requerida por la estructura a proteger

El actual sistema de protección catódica está determinado por la casa clasificadora para cubrir la obra viva equivalente a 520 [m²] con una densidad de corriente de 0,015 [A/m²], es decir, la casa clasificadora considera una corriente requerida igual a 7,8 [A] determinada a partir de la siguiente expresión:

$$j = \frac{I}{A} \quad [ec. 10]$$

4.4.6 Obtener el mínimo número de ánodos

Para calcular la cantidad mínima de ánodos requeridos para suministrar dicha corriente se utiliza la identidad:

$$N = \frac{\text{Total corriente requerida}}{\text{Corriente salida por ánodo}} \quad [ec. 11]$$

Luego, el número de ánodos es:

$$N = \frac{7,8 [A]}{\left(\frac{9,62}{2}\right) \left[\frac{A}{\text{ánodo}}\right]} = 1,6 \approx 2 [\text{ánodos}]$$

A partir de la ec.7 se determina que el tiempo de vida de un ánodo de 28 kg es:

$$P = \frac{K \cdot Q}{A \cdot j} = \frac{28[kg/\text{ánodo}] \cdot 780 \left[\frac{A \cdot h}{kg}\right]}{9,62 [A/\text{ánodo}]} \approx 2.270 [h] \approx 0,26[años]$$

Por ende, para cubrir un requerimiento de 3 años empleando el sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio de zinc se necesitarían aproximadamente 12 ánodos (336 kg) de 28 kg cada uno, siendo un valor cercano a los obtenidos teóricamente por la fórmula proporcionada por la casa clasificadora y adjuntados en la Tabla 6. El requerimiento de los 3 años es porque la empresa lo ha establecido de tal manera.

4.5 Diseño del sistema de corriente impresa

4.5.1 Descripción de la Metodología

Para el diseño del sistema de corriente impresa se empleará la siguiente metodología:

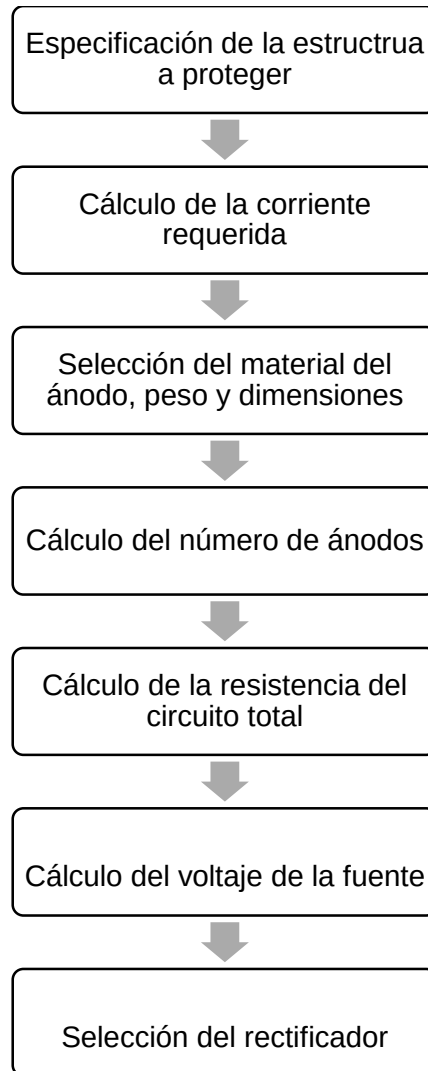


Figura 12: Metodología de diseño para un sistema de corriente impresa (Fuente: Elaboración propia)

- 1. Especificación de la estructura a proteger:** en el diseño de un sistema de corriente impresa es vital conocer las dimensiones de la estructura a proteger, pues así se determina el área a ser protegida.

En esta sección del diseño se deben considerar 2 aspectos importantes del sistema de protección:

- **Determinación del aislamiento eléctrico:** si una estructura será protegida por un sistema de corriente impresa ésta debe ser conectada eléctricamente al ánodo. Es por ello que distintas secciones del sistema a ser protegido son aisladas eléctricamente entre sí por aisladores correctamente ubicados.
- **Detección de Cortocircuitos:** se deben eliminar todos los cortocircuitos existentes en el sistema de protección catódica, ya que éstos pueden ocurrir por ejemplo cuando la estructura está en contacto con otra causando interferencia en el actual sistema de protección.

2. Cálculo de la corriente requerida: una de las partes críticas en el diseño del sistema de protección catódica es determinar la densidad de corriente.

Si se considera en el diseño acero sin recubrimiento se tienen 3 densidades de corrientes: inicial, final y media.

- **Inicial:** corresponde a la densidad de corriente necesaria para efectuar la polarización de la superficie de acero desnudo inicialmente expuesta. La densidad de corriente inicial es la mayor de las 3 debido a la falta de escalas calcáreas (tizas catódicas).
- **Final:** es la densidad de corriente necesaria para proteger la superficie metálica con crecimiento marino establecido y capas calcáreas. Tiene en cuenta la densidad de corriente necesaria para repolarizar la

estructura en caso de eliminación de estas capas por tormentas, operaciones de limpieza, etc.

- **Media:** es la densidad de corriente requerida una vez que el sistema de protección catódica ha alcanzado su estado estacionario. La densidad de corriente media es la que se utiliza para calcular la masa mínima de material de ánodo necesaria para proteger la estructura durante la vida útil del diseño.

A continuación, en la Tabla 9 se presentan valores típicos de densidades de corrientes a diferentes condiciones climáticas y profundidades.

Tabla 9: Densidades de corriente inicial, final y media para diferentes condiciones climáticas y profundidades (las condiciones climáticas se basan en el rango anual de temperaturas promedio del agua superficial). (Classnotes, 1996)

	Densidades de corriente de diseño [A/m ²]											
	Tropical > 20 [°C]			Sub – tropical 12 – 20 [°C]			Templada 7 – 12 [°C]			Ártico < 7 [°C]		
Profundidad [m]	Inicial	Final	Media	Inicial	Final	Media	Inicial	Final	Media	Inicial	Final	Media
0 – 30	0,150	0,090	0,070	0,170	0,110	0,080	0,200	0,130	0,100	0,250	0,170	0,120
>30	0,130	0,080	0,060	0,150	0,090	0,070	0,180	0,110	0,080	0,220	0,130	0,100

Una vez definidos los principales factores que influyen en el cálculo de la intensidad de corriente requerida ésta se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$I = A \cdot j \cdot f \cdot (1 - E_r) \quad [ec. 12] \text{ (Gentil, 1996)}$$

donde:

- I : intensidad de corriente [A]
- A : Área a ser protegida [m²]
- j : densidad de corriente de protección [A/m²]
- f : factor de corrección de velocidad
- E_r : eficiencia del revestimiento (0 – 1)

La eficiencia del revestimiento E_r se puede definir como el porcentaje de la superficie metálica efectivamente revestida o recubierta. Por ejemplo, si el recubrimiento tiene un 90% de eficiencia (0,9) quiere decir que un 10% de la superficie metálica está descubierta o no será protegida por el recubrimiento y que, por lo tanto, se necesitará sólo un 10% de la corriente necesaria para proteger toda la estructura desnuda y así la densidad de corriente de protección es proporcional a la fracción de superficie descubierta o no protegida.

La Tabla 10 presenta la eficiencia media de diversos tipos de revestimientos:

Tabla 10: Eficiencias medias de diversos tipos de revestimientos (Gentil, 1996)

Tipo de estructura a proteger	Calidad del revestimiento	Eficiencia (%)
Tuberías enterradas o sumergidas	Excelente	90 – 95
	Bueno	80 – 90
	Regular	50 – 80
	Malo	0 – 50
Recubrimiento de estanque (parte externa)	Bueno	60 – 80
	Regular	40 – 60
	Malo	0 – 40
Recubrimiento de estanque (parte interna)	Excelente	90 – 95
Embarcaciones	Excelente	90 – 95
	Bueno	80 – 90
	Regular	50 – 80
	Malo	0 – 50

El factor de velocidad es sólo para casos en que hay un movimiento relativo entre la estructura y el electrolito.

En la Tabla 11 se presenta la relación entre la velocidad relativa en [m/s] y el factor de corrección de velocidad:

Tabla 11: Factor f en función de la velocidad relativa estructura - medio

(Gentil, 1996)

Velocidades [m/s]	Factor de corrección de velocidad (f)
1	1,00
2	1,11
3	1,17
4	1,22
5	1,24
6	1,25
7 o más	1,27

3. Selección del material del ánodo, peso y dimensiones: la elección del ánodo no es totalmente arbitraria y la economía determinará que ánodo es el mejor.

Los ánodos cilíndricos son adecuados para proteger construcciones de acero – agua, instalaciones en alta mar y protección interna de estanques. Se suelen utilizar materiales como magnetita, grafito y hierro en alto contenido de silicio. Éstos ánodos no suelen ser sólidos, sino que se producen en forma de tubo. La forma tubular proporciona superficies más grandes y por lo tanto corrientes anódicas más altas. Además, el cable se puede soldar directamente en el ánodo cosa que no ocurre en los ánodos de titanio, ya que tienen provisto una conexión de tornillo soldada que es también de titanio.

Se menciona además que existen ánodos con forma de discos, lingote o de varilla que también se utilizan con frecuencia para mitigar corrosión de acero subacuática de materiales como óxido de metal mixto (MMO), zinc o magnesio.

- 4. Cálculo del número de ánodos:** para determinar el número mínimo teórico de ánodos necesarios para cumplir con las limitaciones de densidades se utiliza la siguiente identidad:

$$N = \frac{L_f \cdot C \cdot I}{M} \quad [ec. 13]$$

(Technical Manual: Electrical Design, Cathodic Protection, 1985)

donde L_f es el tiempo de vida (cuántos años), C es la tasa de consumo de ánodo, I es la intensidad de corriente requerida y M la masa de ánodo.

- 5. Cálculo de la resistencia del circuito total:** se debe calcular la resistencia total (cables de cátodo y ánodo) para calcular el tamaño del rectificador necesario:

$$R_T = R_W + R_C + R_A \quad [ec. 14]$$

en dicha ecuación R_W representa la resistencia del cableado, R_A es la resistencia de los ánodos y R_C la resistencia de la estructura – electrolito.

Para determinar la Resistencia de los ánodos utilizamos el modelo que más se adecúe a la geometría del ánodo seleccionado según los prototipos presentados en la Tabla 7.

Por otro lado, para obtener la Resistencia del cableado se utiliza la siguiente expresión:

$$R_W = R_e \left[\frac{\Omega}{100 ft} \right] \cdot L_e [ft] \quad [ec. 15]$$

(Technical Manual: Electrical Design, Cathodic Protection, 1985)

siendo R_e la resistencia específica del material del cableado en 100 [ft] y L_e el largo de la estructura a proteger.

Finalmente, R_C correspondiente a la resistencia de estructura – electrolito que para el caso de los sistemas en donde los electrolitos son de baja resistividad eléctrica, el valor de R_C será muy pequeño respecto a las otras resistencias, pudiendo ser despreciado en los cálculos (Gentil, 1996).

Así, obtenidas todas las resistencias se calcula la resistencia total con el fin de determinar el voltaje del rectificador.

6. Cálculo del voltaje de la fuente: para determinar la tensión del rectificador se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{rec} = I \cdot R_T \cdot 150\% \quad [ec. 16]$$

donde I es la corriente total de protección en amperes, R_T es la resistencia total del circuito y un porcentaje de 150 que permite el envejecimiento de las pilas rectificadoras, ya que al igual que las pilas éste va envejeciendo y va disminuyendo su eficiencia.

- 7. Selección del rectificador:** se debe elegir un rectificador basado en los resultados de la ec.16 que satisfaga los requisitos mínimos de I y V_{rec} de dicha ecuación para asegurar la protección de la estructura especificada en el punto 1.

4.5.2 Aplicación del Método

A partir de la metodología presentada anteriormente en la Figura 12 se realiza el diseño del sistema de protección catódica por corriente impresa para el remolcador de alta mar Pequén.

- 1. Determinación de m^2 de estructura a proteger:** la superficie a proteger corresponde al área de obra viva equivalente a 520 [m^2].
- 2. Cálculo de la corriente requerida:** de acuerdo a las características de las costas chilenas y acorde a los datos proporcionados por la Tabla 9 se selecciona la condición climática templada con una profundidad menor a 30 [m] dando así los siguientes valores de densidades de corriente:

- Densidad de corriente inicial: 0,200 [A/m^2]
- Densidad de corriente final: 0,130 [A/m^2]
- Densidad de corriente media: 0,100 [A/m^2]

Conforme a la definición de densidad de corriente media se utilizará el valor de 100 [mA/m^2] para cálculo del diseño y un factor $f = 1,24$ según lo ilustra la Tabla

11 de velocidad relativa medio – estructura. Esto en base de que el remolcador está un 85% del tiempo varado. Además, se considera una eficiencia de revestimiento del 80%, pues se contempla el caso de que la pintura con el pasar del tiempo se desgasta y por criterios de diseño siempre considerar el peor de los casos, es decir, una eficiencia de revestimiento que no es excelente pero tampoco es mala.

Tomando en cuenta estos parámetros se calcula la corriente requerida:

$$I = 520[m^2] \cdot 0,10 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 1,24 \cdot (1 - 0,80) = 12,90 [A]$$

3. Selección del material del ánodo, peso y dimensiones: el material de ánodo escogido es de aleaciones de plomo – plata – antimonio los cuales son utilizados en aplicaciones con agua de mar. El plomo bajo la corriente anódica desarrolla una película de PbO_2 que es conductora y previene el deterioro del plomo. La velocidad de consumo de las aleaciones de plomo – plata – antimonio (1% Ag – 6%Sb) está en el orden de 0,09 [kg/A·año] (Ver Tabla 3).

Si se comparan este tipo de ánodos frente a los ánodos de sacrificio como lo son los ánodos de zinc, notamos que los ánodos de Pb – Ag – Sb tienen un consumo aproximadamente 120 veces menor que los ánodos de zinc, pues éstos últimos tienen un consumo teórico de 10,64 [kg/A·año] (Ver Tabla 2).

Se debe tener en cuenta que se utilizan exclusivamente en agua salada y que deben estar en agua libre.

4. Cálculo del número de ánodos: utilizando la expresión de la ec.13 se calcula el mínimo número teórico de ánodos considerando la vida útil que se le quiere

dar al sistema y la velocidad de consumo de los ánodos de plomo – plata – antimonio.

Para determinar el número de ánodos conforme al requerimiento de masa anódica mínima para proteger el sistema, primeramente, se obtiene dicha cantidad de masa para luego estimar la cantidad de ánodos de acuerdo a las dimensiones y características que propician los distintos proveedores y bibliografías que datan del tema.

La cantidad de masa anódica mínima requerida considerando una vida útil de 5 años (lo que requiere SAAM) y una vida útil de 20 años que es lo convencional en los sistemas de protección por corriente impresa son las siguientes:

$$N \cdot M = 5[\text{año}] \cdot 0,09 \left[\frac{kg}{A \cdot \text{año}} \right] \cdot 12,9[A] = 5,80 [kg]$$

$$N \cdot M = 20[\text{año}] \cdot 0,09 \left[\frac{kg}{A \cdot \text{año}} \right] \cdot 12,9 [A] = 23,21 [kg]$$

A continuación, se presenta la Tabla 12 que compara la cantidad de masa anódica requerida utilizando ánodos de zinc y ánodos de aleación plomo – plata – antimonio considerando una vida útil de 5 y 20 años:

Tabla 12: Cantidad de masa anódica requerida según material de ánodo (Fuente:

Elaboración Propia)

Material del ánodo	Vida útil [años]	Masa anódica requerida [kg]
Zn	5	686,07
Pb – Ag – Sb	5	5,80
Zn	20	2.744,27
Pb – Ag – Sb	20	23,21

Considerando información técnica contenida en la página de la Empresa *Indaxgal* (Anexo B) se contemplan ánodos de plomo – plata – antimonio de una masa de 7,12 [kg] del tipo tubular con diámetro exterior de 30 [mm] y diámetro interno de 10 [mm]. De esta manera, el número de ánodos para cada caso considerando una vida útil de 20 años es:

$$N_{\text{zinc}} = \frac{2.744,27[\text{kg}]}{28 \left[\frac{\text{kg}}{\text{ánodo}} \right]} \approx 98,01 [\text{ánodos}] = 99 [\text{ánodos}]$$

$$N_{\text{Pb-Sb-Ag}} = \frac{23,21[\text{kg}]}{7,12 \left[\frac{\text{kg}}{\text{ánodo}} \right]} = 3,26[\text{ánodos}] = 4 [\text{ánodos}]$$

Se redondea hacia arriba, para cumplir con el requerimiento mínimo.

Cabe mencionar que al momento de escoger el material del ánodo además de evaluar su consumo teórico [kg/A·año] se deben considerar aspectos como la

capacidad del material para ser fundido en distintas formas y tamaños. Lo anterior facilita la logística y el transporte de dichos ánodos diferenciando por ejemplo a los ánodos de Pb – Ag – Sb de los ánodos de grafito, ya que éstos últimos a pesar de tener excelente desempeño en medios con alto contenido de cloruros son sumamente frágiles, por lo que su transporte y embalaje debe ser cuidadoso.

Por otro lado, a pesar de que los ánodos de titanio tienen un desgaste prácticamente imperceptible, no permiten soldar directamente el cable al ánodo debido a que tienen un tornillo soldado que también es de titanio. Esto no ocurre en el caso de los ánodos de Pb – Ag – Sb, generando mayor factibilidad al momento de instalar.

5. Determinar la resistencia del circuito total: de acuerdo a la geometría cilíndrica del ánodo (por dar superficies más grandes y así generar corrientes anódicas más altas) se utiliza el modelo de McCoy para determinar la resistencia de los ánodos. Aplicando la expresión de McCoy adjuntado en la Tabla 7 se obtiene la siguiente resistencia anódica:

$$R_A = \frac{0,315 \cdot 24 [\Omega \cdot \text{cm}]}{\sqrt{71,65 [\text{cm}^2]}} = 0,89 [\Omega]$$

Para determinar la resistencia del cableado se utilizará la ec.14. Además, la expresión requiere el largo de la estructura a proteger que sería la eslora del RAM Pequén que según la ficha adjuntada en el Anexo C data una eslora de 30,5 [m].

De acuerdo a el código eléctrico de los Estados Unidos (NFPA – 70) American Wire Gage (AWG) estima conductores aislados de cobre permisibles

y con una capacidad en amperaje de temperatura y caídas de voltaje aceptables en el sistema de energía.

La Tabla 13 indica los amperajes máximos recomendados para los cables de corriente directa, basada en una carga nominal de 2.000 [milipulgadas] circulares de cobre por amperio.

Tabla 13: Valores normalizados de cable A.W.G. (Pachón)

Tamaño del cable AWG	Amperaje máximo recomendado [A]	Ohm/1000 m. de cable , 20 [°C]
8	8	2,1391
6	13	1,3484
4	20	0,8465
2	30	0,5315
1	40	0,4232
1/0	55	0,3346
2/0	65	0,2657
3/0	85	0,2064
4/0	105	0,1673

Luego, respecto a la corriente requerida se escoge el Tamaño de Cable AWG 6 con una resistencia específica de 1,3484 [Ω /1.000 m]. Así, la resistencia del cableado es:

$$R_W = \left(\frac{1,3484}{1000} \left[\frac{\Omega}{m} \right] \cdot \frac{1}{3,28} \left[\frac{m}{ft} \right] \cdot 10 \right) \cdot \left(30,5 [m] \cdot \frac{3,28}{1} \left[\frac{ft}{m} \right] \right) = 0,41 [\Omega]$$

El valor de R_C se puede considerar despreciable según (Gentil, 1996) para cualquiera sea el caso en que el sistema se encuentre inmerso en zonas donde los electrolitos son de baja resistividad eléctrica.

Finalmente, tal como lo indica la expresión de la ec.14 se calcula la resistencia total:

$$R_T = R_W + R_C + R_A = 0,41[\Omega] + 0[\Omega] + 0,89[\Omega] = 1,30[\Omega]$$

- 6. Calcular el voltaje de la fuente:** obtenida la resistencia total del sistema y la corriente requerida, se calcula el voltaje del rectificador utilizando la ec.16:

$$V_{rec} = 12,90[A] \cdot 1,30[\Omega] \cdot 150\% = 25,15[V]$$

- 7. Selección del rectificador:** se escoge un rectificador con transformador monofásico capaz de satisfacer el requerimiento mínimo de corriente de 12,90 [A] y 25,15 [V] de tensión respectivamente. Esto es independiente del material del ánodo, es decir, el rectificador a escoger puede ser implementado para ánodos de zinc o de plomo – plata – antimonio.

5. Estudio Económico

5.1 Inversión

La inversión del sistema de corriente impresa va a estar dado por el listado de equipos requeridos, el cual consta de:

- Cableado de cobre 06 AWG 3C SHIELD, 1.000 [ft]
- Rectificador para protección catódica, Voltaje de salida 0 – 50 V, Corriente de salida 0 – 50 A
- Electrodo de referencia Ag/AgCl para agua de mar
- Ánodos de Pb – Ag – Sb

A continuación, la Tabla 14 presenta los valores referenciados y cotizados de los equipos presentados anteriormente y el impuesto total asociado por envío:

Tabla 14: Costo de materiales y equipos (Fuente: Elaboración Propia)

Equipos	Cantidad	Unidad	Monto
Rectificador para protección catódica Voltaje de salida: 0 – 50 V Corriente de salida: 0 – 50 A	1	USD	15.000
Electrodos de referencia Ag/AgCl para agua de mar	5	USD	1.000
Ánodos de Pb – Ag – Sb	4	USD	248

Cableado de Cobre 06 AWG 3C SHIELD, 1000 [ft]	1	USD	6.146
Impuestos	-	USD	2.442
Total	-	USD	24.835

Además, en la Tabla 15 se adjunta la depreciación para cada equipo de acuerdo a la información proporcionada por el servicio de impuestos internos:

Tabla 15: Depreciación lineal de los equipos (Fuente: Elaboración Propia)

Equipos	Depreciación lineal
Rectificador	10 años
Cableado de cobre	20 años
Ánodos	10 años
Electrodos	10 años

5.2 Estructura de costos

5.2.1. Costos de Instalación

En base a la adjudicación del proyecto “Sistema de Protección Catódica e Intermarea Terminales EPA” según ilustra (EPAUSTRAL , 2010), se considera un período de 2 meses para el diseño, implementación y montaje del sistema de protección catódica.

La Tabla 16 ilustra los costos de instalación relacionados a la puesta en marcha de la protección catódica por corriente impresa:

Tabla 16: Costos de Instalación (Ballesta, 2012)

	Profesional	Número de Operarios	Horas diarias	Días trabajados	Costo Hora ⁶ (USD)	Costo Final (USD)
Instalación de la Protección Catódica	Técnico en Protección Catódica	3	8	31	9,38	6.979
	Probador de Protección Catódica (Tester)	2	8	31	8,86	4.395

5.2.2. Costos de Ingeniería

En base a la misma información proporcionada para los costos de instalación, se consideran los siguientes costos de ingeniería y reingeniería⁷:

⁶ Los precios hora fueron obtenidos de la fuente: (Riggs Larsen, 2011)

⁷ Los costos de ingeniería son los más importantes, pues son los que se realizan al principio de la vida útil del sistema de protección. Para el caso de los costos de reingeniería se considera la mitad de vida útil del sistema.

Tabla 17: Costos de ingeniería y reingeniería (Ballesta, 2012)

	Profesional	Horas invertidas	Precio hora ingeniería (USD)	Costo unitario (USD)
Diseño de la Protección Catódica	Especialista Protección Catódica	720	13,66	9.835
	Especialista en selección de material y diseño	720	13,64	9.821
Reingeniería	Especialista Protección Catódica	360	13,66	4.918
	Especialista en selección de material y diseño	360	13,64	4.910

Para los sistemas de protección catódica los costos de ingeniería (Diseño de protección catódica) e instalación se consideran como parte de la inversión, y la reingeniería como reinversión en el año 10, mitad de la vida útil del sistema.

5.2.3. Costos Fijos

Como parte de los costos fijos se consideran los costos asociados a los Diques a los que se somete el Remolcador Pequeño en un período de 2,5 años, en que principalmente destacan:

Tabla 18: Costos Fijos (Fuente: SOCIBER)

Maniobra	Unidad	Monto
Varada y desvarada	USD	12.000
Servicios (conexión agua dulce, agua salada, electricidad, aire, etc.)	USD	5.000
Carena del Casco	USD	1.000
Trabajo en caja de mar	USD	1.000
Revisión de sistema Azimutal	USD	21.000
Sistema de fondeo	USD	3.500
Pruebas hidrostáticas	USD	8.000
Limpieza de estanques	USD	4.000
Varios	USD	500
Costo de oportunidad ⁸	USD	60.000
Total	USD	116.000

⁸ El costo de oportunidad se obtuvo en base a información proporcionada por la empresa en que el remolcador realiza en promedio 90 maniobras en 30 días generando una ganancia de USD 2.000 por maniobra y considerando una estancia en Dique de 10 días.

5.2.4. Costos Variables

Los costos variables que surgen en el sistema de protección por corriente impresa están asociados a mediciones y control de la corrosión en la nave, los cuales se presentan en la Tabla 19:

Tabla 19: *Costos variables (Fraga Rivas, 2016)*

Maniobra	Unidad	Monto
Control y medición de potencial	USD	297
Trabajos de medición de potencial	USD	380
Verificación de correcta operación del sistema posterior a 3 y 6 meses de uso	USD	415
Total costos variables	USD	1.092

5.2.5. Flujo de Caja

En la sección de Anexos se adjunta el flujo de caja para el sistema de corriente impresa y, además, se adjuntan los flujos de caja considerando el caso de ánodos de sacrificio y de corriente impresa con ánodos de zinc contemplando un período de evaluación de 10 años.

5.2.6. Evaluación Económica

En consideración de los valores y estructura de costos presentes en los 3 casos de sistemas de protección (ánodos de sacrificio de zinc, corriente impresa con ánodos de aleación plomo – plata – antimonio y corriente impresa con ánodos de zinc) se presenta el siguiente análisis:

- La inversión en el sistema de ánodos de sacrificio es la menor respecto de los tres casos estudiados con un valor cercano a los USD 28.895 (Ver Anexo E), sin embargo, es la que presentaría mayores costos asociados a Dique pues en ello tiene vinculado los costos de proveer e instalar los nuevos ánodos. Estos costos representarían aproximadamente un 6,15% del total de los costos de Dique, que a pesar de no tener gran relevancia se podrían evitar en los 8 Diques realizados si se contempla un período de 20 años que es el tiempo de vida útil para el cual está diseñado del sistema de corriente impresa.
- El sistema de corriente impresa con ánodos de aleación plomo – plata – antimonio tiene una inversión inicial de USD 55.864 (Ver Anexo F), por debajo del mismo sistema si utilizara ánodos de zinc, ya que este último requiere una mayor cantidad de ánodos generando una inversión de USD 71.735 (Ver Anexo G).
- El sistema de ánodos de sacrificio no presenta costos variables a diferencia de los otros dos sistemas, pues en el sistema de corriente

impresa es vital que funcione el sistema de control para tener un mayor resguardo y mitigación efectiva ante los problemas de corrosión.

- En un período de 10 años el sistema de ánodos de sacrificio va a generar menores costos con un valor cercano a los USD 270.952, por debajo del sistema de corriente impresa con ánodos de Pb – Ag – Sb el cual tiene asociado un total de USD 298.530 y más por debajo aún del sistema de corriente impresa con ánodos de zinc que generaría USD 314.277 asociados a costos.

Conclusiones y Recomendaciones

En vista de los antecedentes ilustrados en el presente estudio técnico – económico y de acuerdo a los requerimientos de la Empresa SAAM, se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones para el sistema de protección catódica del remolcador de Alta Mar Pequén:

- El actual sistema de protección catódica presenta una ineficiencia clara debido a que el consumo real de masa anódica existente en el remolcador es 3 a 4 veces mayor que el consumo teórico que expone la casa clasificadora. Esto debe estar asociado, principalmente, a fuentes de corrientes de fuga, mala aislación de los equipos eléctricos y sus conexiones y problemas con el revestimiento y pintura de la nave.
- Empleando el sistema de protección catódica por corriente impresa con ánodos de plomo – plata – antimonio para una vida útil de 20 años el requerimiento de masa anódica es de aproximadamente 23,21 [kg], casi 120 veces menor si se utilizaran ánodos de zinc generando un requerimiento de masa anódica de 2744,27 [kg].
- Con el sistema de corriente impresa la corriente mínima requerida es de 12,90 [A] asociado a un voltaje de fuente de 25,15 [V].
- La inversión inicial del método por corriente impresa con ánodos de aleación Pb – Ag – Sb es de USD 55.864, que a pesar de ser mayor a la de ánodos de sacrificio está diseñada para una vida útil de 20 años, prácticamente 8 – 10 veces mayor a la vida útil de los ánodos de

sacrificio los cuales son reemplazados cada 2 – 2,5 años. A su vez los costos totales en un período de evaluación de 10 años son mayor también a la de ánodos de sacrificio, pero se destaca la inexistencia de costos de adquisición de ánodos de sacrificio por recambio y costos de instalación.

- Tomando en cuenta la evaluación económica en 10 años de los tres sistemas de protección se descarta emplear el método de corriente impresa con ánodos de zinc, pues es el que presenta mayor inversión inicial y requerimiento de masa anódica debido al consumo anódico que presenta el material de zinc en $[\text{kg}/\text{A}\cdot\text{año}]$ (Ver Tabla 2), que es bastante mayor al de ánodos de plomo – plata – antimonio. El método de corriente impresa con ánodos de plomo – plata – antimonio van a compensar su inversión y costos totales con su eficiencia y durabilidad respecto al de ánodos de sacrificio.

Finalmente, se recomienda emplear el método de corriente impresa como sistema de protección pues como se detalla compensa su inversión y costos con su eficiencia contra la corrosión, siempre y cuando sea con ánodos inertes y no con ánodos de material de zinc, es decir, con ánodos que tengan un consumo en $[\text{kg}/\text{A}\cdot\text{año}]$ de unos 2 órdenes de magnitud menor al de zinc.

Bibliografías

Ahdash, A. (2010). *Design of impressed current cathodic protection for steel immersed in freshwater*. Universiti Teknologi Malaysia, Faculty of Mechanical Engineering.

Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*.

AMAC CORROSION. (2017). Recuperado el 04 de 11 de 2017, de <https://www.amacgroup.com.au/amac-corrosion>

Ávila, J., & Genescá, J. (1989). *Más allá de la herrumbre II. La lucha contra la corrosión*.

Ballesta, M. (2012). *Análisis de la protección contra la corrosión de Estructura Jacket*. Cartagena.

Bard, A., & Faulkner, L. (2001). *Electrochemical Methods Fundamentals and Applications*.

Classnotes, S. (1996). *Cathodic Protection Design*.

Det Norske Veritas. (2010). *Cathodic Protection Design*.

EPAUSTRAL . (2010). Obtenido de <http://www.epaustral.cl/sistema-de-proteccion-catodica-terminales-epa/>

Fontana, M. G. (1987). *Corrosion engineering*. Singapore: McGraw - Hill Book Company.

Fraga Rivas, A. J. (2016). *Ingeniería Marina: Sistemas de protección catódica a bordo*. Coruña.

Gentil, V. (1996). *Corrosão*. Río de Janeiro: LTC.

Gómez de León, F., & Alcaraz, D. (2004). *Manual básico de corrosión para ingenieros*. Murcia.

Gonzalez, J. (1989). *Control de la Corrosión: Estudio y medida por Técnicas Electroquímicas*. Madrid.

Kulkarni, M. (2011). *Corrosion in marine environment*.

LaQue, F. (1975). *Marine Corrosion Causes and Prevention*.

Martínez, E. (01 de 2014). *Reparación Subacuática sobre pilotes*. Obtenido de Hidrodem.

Molina, M. (27 de Abril de 2009). *Control de Ánodos*. Obtenido de Pronautica.

NACE. (2004). *Course manual Level 2*. NACE INTERNATIONAL.

Pachón, J. C. (s.f.). *Protección Catódica mediante ánodos de sacrificio y corriente impresa para estructuras en suelos y ambientes marinos*.

Payanotova, Garbatov, & Guedes. (2004). Factors influencing atmospheric corrosion and corrosion in closed spaces of marine steel structures. *Seventh international conference on marine science and technology*, (págs. 1 - 2).

Quiroz Amaris, G., & Yépez Martelo, H. (2003). *Estudio de los factores a considerar en la reparación de embarcaciones en la empresa Astilleros Vikingos S.A.* Cartagena de Indias D.T. y C.

Rayo, M. (2006). *Protección Catódica con Ánodos de Sacrificio para Plataformas Marinas*. Instituto Politécnico Nacional, México D.F.

Riggs Larsen, K. (2011). Corrosion salaries inch higher in North America, continuing the upward trend. *Material Performance*.

Rosario Francia, S. (2004). Protección catódica - Diseño de ánodos de sacrificio. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 37 - 44.

SAAM. (2016). Obtenido de <http://www.saam.com/compania/>

Sesé, E. (2014). *Mantenimiento preventivo de la corrosión aplicado a la obra viva del buque*. Universidad de la Laguna, España.

Simoncini, P. (s.f.). *Aspectos Generales de la Protección Catódica de Cascos de Acero*. Escuela de Oficiales de la Armada (ESOA).

Smith, P. (2014). *Piping Materials. Guide Selection and Applications*.

SOCIBER. (2015). *Inspección de arribo*.

SOCOMET. (2017). *Certificado composición química ánodos de zinc*. SOCOMET S.A., Concepción.

(1985). *Technical Manual: Electrical Design, Cathodic Protection*. Department of the army.

Virmani, P. (s.f.). CORROSION COSTS AND PREVENTIVE STRATEGIES IN THE UNITED STATES.

Anexos

Anexo A: Análisis químico de la composición de ánodos de zinc emitido por el
Depto. de Química de la Universidad Técnica Federico Santa María



INFORME DE ANÁLISIS N° QUI-083-17

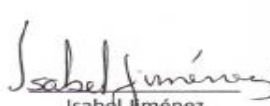
Fecha emisión:
05.07.2017

Información del cliente		
Nombre de la empresa	Universidad Técnica Federico Santa María.	
Solicitante	Profesora Andrea Lazo	
Dirección	Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, IQA.	
Información del análisis y muestra		
Análisis solicitado	Aluminio, Cinc, Cadmio, Silicio	
Tipo de muestra	Virutas metálicas	
Identificación muestra	Ánodo de cinc	CI 285
Fecha de recepción	13 de junio de 2017	
Método utilizado	Al, Cd: ASTM E 536-05; Digestión ácida y cuantificación por Absorción atómica. Zn: Digestión ácida (ASTM E 536-05) y Cuantificación por volumetría. Si: Digestión ácida y Cuantificación por espectrofotometría visible.	
Responsable Muestreo	Profesora Andrea Lazo	

RESULTADOS

Resultados análisis		Código Interno
		CI 285
Aluminio	[g Al/100 g. de muestra]	0,193 ± 0,005
Cinc	[g Zn/100 g. de muestra]	98,9 ± 0,5
Cadmio	[g Cd/100 g. de muestra]	0,078 ± 0,002
Silicio	[g Si/100 g. de muestra]	< 0,05

Fin del documento



Isabel Jiménez
Químico analista

Verónica Saavedra
Químico analista

María Elena Ortiz
Jefe de Laboratorio

Av. España 1680, Valparaíso
www.labqi.cl

servicios.analiticos@usm.cl
32 2 654219

Los resultados entregados en este Informe solo se refieren a los ítemes ensayados.
Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación escrita de este Laboratorio.

QUI-083-17
Versión 01
Página 1 de 1

Anexo B: Descripción y características típicas de ánodos de aleación de plomo de la empresa Indaxgal

Descripción y características :

A continuación, presentamos los diseños y composiciones , más utilizados, si no encuentra lo que necesita no dude en consultar otras posibilidades.

1.- COMPOSICIONES HABITUALES:

- Plomo (Pb)
- Plomo/Estaño (Pb + Sn)
- Plomo/Estaño/Plata (Pb + Sn + Ag)
- Plomo/Antimonio (Pb + Sb)
- Otras opciones

El porcentaje de cada elemento depende de las necesidades del cliente

2.- DIBUJOS MÁS UTILIZADOS

- Modelos redondos y cuadrados.

Denominación del Modelo :	Dibujo Dimensiones en mm	Superficie de Contacto	Peso por metro lineal
Tubo – 55 / 9 estriado		208 mm	17,97 kg
Barra - 40		125,6 mm	14,2 kg
Tubo – 30 / 10		94,2 mm	7,12 kg

Nota: amplia gama de barras y tubos disponible

indaxgal
profesionales de la galvanotecnia

C/Obedulio Fernández 11 b.j. 09005 Burgos Tel 942 700 378
C/Valencia N°20 46161 Benisanó (Valencia) info@indaxgal.com

Anexo C: Ficha del Remolcador de Alta Mar Pequeño



REMOLCADOR

Pequén

DATOS PRINCIPALES

CLASIFICACIÓN	LRS Remolcador
AÑO	2001
ASTILLERO	Xuexin Shipyard Guangzhou, P.R.C.
IMO	9253650
ISM	725002040

EQUIPOS DE CUBIERTA

CABRESTANTE	Shipneeds Marine SMS 1250- HAWW/GDG-1901 2 1.6 ton 90 ton
WINCHE DE REMOLQUE	Shipneeds Marine 10 tm - 15m/min 400 m D= 52/mm
GANCHO DE REMOLQUE	Suntech Marine SMS-HTW/SD10 80 ton

PROPULSIÓN

MOTORES PRINCIPALES	2xCaterpillar, 3516 B
POTENCIA TOTAL	4000 BHP
PROPULSIÓN	2xSchottel SRP 1212 FP
GENERADORES PRINCIPALES	2xCaterpillar, 3304 B
POTENCIA ELÉCTRICA	210 kw 380V

EQUIPOS DE NAVEGACIÓN Y COMUNICACIÓN

MF/HF	JRC mod. JSB-196 GM
VHF	Icom mod. IC-M502
INMARSAT C	---
RADAR	1xJRC mod. JMA-2254
AIS	---
COMPAS MAGNÉTICO	Saura mod. MR 150
PILOTO AUTOMÁTICO	Autonav A 1500

DIMENSIONES

ESLORA	30.5 m
MANGA	9.8 m
CALADO MEDIO	3.5 m
PUNTAL	4.50 m
TRG	316 ton

RENDIMIENTO

BOLLARD PULL	55.43 tm
--------------	----------

CAPACIDAD ESTANQUES

PETRÓLEO	135.2 m³
AGUA DULCE	40.3 m³
ESPUMA	---

ACOMODACIONES

CAMAROTES	10
-----------	----

OTROS EQUIPOS

SIST. CONTRA INCENDIO	Si
FI FI	Si
GRUA	No



CATÁLOGO REMOLCADORES SAAM

Anexo D: Cotización realizada por la empresa Mouser Electronics para el cableado
de cobre



Representante de Atención al Cliente:
Aldo Alatorre
Teléfono/Fax: +1 817 804 3888/+1 (817) 804-3898
aldo.alatorre@mouser.com

Cotización Para:
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
AVENIDA ESPANA 1680
239-0123 VALPARAISO

Página 1 de 1

www.mouser.cl

CL

Número de Cotización:

Quote Number: **Q972C70**

Número de Cliente		Información de Referencia del Cliente		Solicitado Por		Oferta válida por 30 días, a menos que se indique otro plazo Prices valid for 30 days from date quoted unless otherwise indicated	
Customer Number		Customer Reference Information		Requested by			
5758793				WALDO FABIAN PEREZ FREZ			
Número de Línea	Número de Parte de Mouser	Mouser Part Number	Cantidad	Precio Por	Precio	Mínimo	Disponibilidad / Comentarios
Line	Número de Parte del Cliente	Customer Part Number	Quantity	Unidad (USD)	Total (USD)	Múltiple	Availability / Comments
Number	Número de Parte del Fabricante	Manufacturer Part Number	Quantity	Unit Price	Extended	Minimum	Availability / Comments
	Descripción	Description		(USD)	Price (USD)	Multiple	
1	602-V16306-1000	Fecha de la	1	6145.600	6145.60	MÍN.: 1	Plazo de entrega promedio de fábrica: 10-12 semanas Según el tamaño y el peso del producto, el costo del envío puede aumentar
	Cotización: ENERO 03, 2					MÚLT.: 1	
	NP CLIENTE:						
	NP FABRIC.: V16306 BK001						
	06AWG 3C SHIELD						
	Alpha Wire Multi-Conductor Cables						
	RoHS: Cumple						
	ECCN: EAR99 / US HTS: 8544499000						

Anexo E: Flujo de caja para el sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio

Interés	14%										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingreso por Ventas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(-) Costos fijos		0	123611	0	0	123611	0	123611	0	0	123611
(-) Costos Variables		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(=) Utilidades Operacionales	0	0	-123611	0	0	-123611	0	-123611	0	0	-123611
(-) Depreciación		509	509	509	509	509	509	509	509	509	509
(-) Pérdida Ejercicio Anterior			0	123611	0	0	123611	0	123611	0	0
(-) Valor Libro		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(=) Utilidad Antes de Impuestos	0	-509	-124120	-124120	-509	-124120	-124120	-124120	-124120	-509	-124120
(-) Impuestos		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(=) Utilidad Después de Impuestos		-509	-124120	-124120	-509	-124120	-124120	-124120	-124120	-509	-124120
(+) Depreciación		509	509	509	509	509	509	509	509	509	509
(+) Pérdida Ejercicio Anterior			0	123611	0	0	123611	0	123611	0	0
(+) Valor Libro		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(-) Inversión inicial	28895										
Flujo Caja Puro	-28895	0	-123611	0	0	-123611	0	-123611	0	0	-123611
Flujo Caja Actualizado	-28895	0	-95115	0	0	-64200	0	-49400	0	0	-33343
Flujo Caja Actualizado Acumulado	-28895	-28895	-124010	-124010	-124010	-188209	-188209	-237609	-237609	-237609	-270952

Anexo F: Flujo de caja para el sistema de protección catódica por corriente impresa con ánodos de plomo – plata – antimonio.

Interés	14%										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingreso por Ventas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(-) Costos fijos		0	116000	0	0	116000	0	116000	0	0	116000
(-) Costos Variables		2442	2442	2442	2442	2442	2442	2442	2442	2442	2442
(=) Utilidades Operacionales	0	-2442	-118442	-2442	-2442	-118442	-2442	-118442	-2442	-2442	-118442
(-) Depreciación		1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944
(-) Pérdida Ejercicio Anterior			2442	118442	2442	2442	118442	2442	118442	2442	2442
(-) Valor Libro		0	0	0	0	0	0	0	0	0	3073
(=) Utilidad Antes de Impuestos	0	-4386	-122828	-122828	-6828	-122828	-122828	-122828	-122828	-6828	-125901
(-) Impuestos		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(=) Utilidad Después de Impuestos		-4386	-122828	-122828	-6828	-122828	-122828	-122828	-122828	-6828	-125901
(+) Depreciación		1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944
(+) Pérdida Ejercicio Anterior			2442	118442	2442	2442	118442	2442	118442	2442	2442
(+) Valor Libro		0	0	0	0	0	0	0	0	0	3073
(-) Inversión inicial	55864										9828
Flujo Caja Puro	-55864	-2442	-118442	-2442	-2442	-118442	-2442	-118442	-2442	-2442	-128270
Flujo Caja Actualizado	-55864	-2142	-91137	-1648	-1446	-61515	-1113	-47334	-856	-751	-34600
Flujo Caja Actualizado Acumulado	-55864	-58007	-149144	-150792	-152238	-213753	-214866	-262199	-263055	-263806	-298406

Anexo G: Flujo de caja para el sistema de protección catódica por corriente impresa
con ánodos de zinc.

Interés	14%
---------	-----

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingreso por Ventas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(-) Costos fijos		0	116000	0	0	116000	0	116000	0	0	116000
(-) Costos Variables		2442	2442	2442	2442	2442	2442	2442	2442	2442	2442
(=) Utilidades Operacionales	0	-2442	-118442	-2442	-2442	-118442	-2442	-118442	-2442	-2442	-118442
(-) Depreciación		1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944
(-) Pérdida Ejercicio Anterior			2442	118442	2442	2442	118442	2442	118442	2442	2442
(-) Valor Libro		0	0	0	0	0	0	0	0	0	3073
(=) Utilidad Antes de Impuestos	0	-4386	-122828	-122828	-6828	-122828	-122828	-122828	-122828	-6828	-125901
(-) Impuestos		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(=) Utilidad Después de Impuestos		-4386	-122828	-122828	-6828	-122828	-122828	-122828	-122828	-6828	-125901
(+) Depreciación		1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944	1944
(+) Pérdida Ejercicio Anterior			2442	118442	2442	2442	118442	2442	118442	2442	2442
(+) Valor Libro		0	0	0	0	0	0	0	0	0	3073
(-) Inversión inicial	71735										9828
Flujo Caja Puro	-71735	-2442	-118442	-2442	-2442	-118442	-2442	-118442	-2442	-2442	-128270
Flujo Caja Actualizado	-71735	-2142	-91137	-1648	-1446	-61515	-1113	-47334	-856	-751	-34600
Flujo Caja Actualizado Acumulado	-71735	-73877	-165014	-166663	-168109	-229624	-230736	-278070	-278926	-279677	-314277

Anexo H: Distribución de los ánodos de zinc en el actual sistema de protección del
remolcador de alta mar Pequén

