

**VIABILIDAD DE UTILIZAR LA TERMOGENERACIÓN A PARTIR DEL FLUIDO
TRANSPORTADO POR LOS GASODUCTOS PARA LA ALIMENTACIÓN DE
UNIDADES RECTIFICADORAS DE PROTECCION CATÓDICA**

CARLOS ARTURO CANO SAAVEDRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2012**

**VIABILIDAD DE UTILIZAR LA TERMOGENERACIÓN A PARTIR DEL FLUIDO
TRANSPORTADO POR LOS GASODUCTOS PARA LA ALIMENTACIÓN DE
UNIDADES RECTIFICADORAS DE PROTECCION CATÓDICA**

CARLOS ARTURO CANO SAAVEDRA.

**MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TITULO DE ESPECIALISTA EN INGENIERIA
DE GAS**

Director

EDUARDO CRISTANCHO HIGUERA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A Dios por su apoyo en todas las etapas de mi vida, a mi familia ,
amigos y a todos quienes han estado para respaldarme cuando lo
he necesitado

Calos A. Cano S.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
2. JUSTIFICACION	15
3. OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GENERAL	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
4. MARCO TEÓRICO.....	17
4.1 CORROSIÓN	17
4.2 PROTECCIÓN CATÓDICA.....	19
4.3 TIPOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	22
4.4 PROTECCIÓN POR ÁNODOS DE SACRIFICIO	23
4.5 CAMPOS DE UTILIZACIÓN DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO	25
4.5.1 Zinc.....	26
4.5.2 Aluminio.....	27
4.5.3 Magnesio.....	28
4.6 ÁNODOS ENTERRADOS.....	28
4.7 PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA	30
4.9 PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTES TERMOGENERADAS	32
5. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA DE LA TERMOELECTRICIDAD	35
5.1 EL EFECTO SEEBECK [7]	36
5.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	39
5.4 COMPARACIÓN CON OTRAS TECNOLOGÍAS	43
5.4.1 Redes eléctricas.....	43
5.4.2 Grupos electrógenos convencionales.....	43
6. CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LA PROTECCIÓN CATÓDICA EN TUBERIAS ENTERRADAS	45
6.1 RESPECTO A LA ESTRUCTURA A PROTEGER	45
6.2 RESPECTO AL MEDIO	46
6.3 EJERCICIO PRÁCTICO DE APLICACIÓN	46
6.4 DESCRIPCION DEL EJERCICIO	47
6.5 PROTECCION CATODICA CON ANODOS DE SACRIFICIO	51
6.5.1 Densidad de Corriente requerida	51
6.5.2 Selección de material Anódico.....	51
6.5.3 Cálculo de la resistencia del sistema.....	52
6.5.4 Cálculo de la resistencia del cátodo.....	53
6.5.5 Cálculo de la resistencia del cable.....	54
6.5.6 Cálculo de la resistencia del ánodo	54
6.5.7 Numero de ánodos requeridos.....	55
6.6 PROTECCION CATÓDICA USANDO CORRIENTE IMPRESA	58
6.6.1 Numero de ánodos requeridos.....	58
6.6.2 Pre-cálculo de la potencia del rectificador.	61
6.6.3 Resistencia del ánodo	61
6.6.4 Resistencia total.....	62
6.6.5 Voltaje para cada tramo.	62
6.6.6 Potencia del rectificador para cada tramo.	63
6.6.7 Selección de los Rectificadores	63
6.7 COSTOS DE INSTALACIÓN Y OPERATIVOS DEL SISTEMA DE PROTECCION CATÓDICA MEDIANTE RECTIFICADORES	64
6.8 COSTOS DE INSTALACIÓN Y OPERATIVOS DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA MEDIANTE TERMOGENERACIÓN.....	66

6.8.1	Selección de los Termogeneradores	67
6.8.2	Costos de instalación y operativos del sistema de protección catódica por corriente impresa	68
	CONCLUSIONES	70
	BIBLIOGRAFÍA	72

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Corrosión y mecanismo de la corrosión.	18
Figura 2. Representa un par ánodo-cátodo situado en el mismo trozo de metal sumergido.	20
Figura 3. Protección Catódica.	21
Figura 4. Protección Catódica con Ánodo de sacrificio.....	24
Figura 5. Instalación típica con ánodo de sacrificio.....	29
Figura 6. Protección Catódica con corriente impresa.	30
Figura 7. Instalación típica con corriente impresa.....	32
Figura 8. Esquema del experimento realizado por Thomas Seebeck.....	35
Figura 9. Efecto Seebeck.....	37
Figura 10. Efecto Peltier.....	38
Figura 11. Esquema de representación de un elemento TEG.....	40
Figura 12. Termopila en construcción.....	41
Figura 13. Sistemas Fotovoltaicos.....	44
Figura 14. Perfil Topográfico.....	47
Figura 15. Cálculo del diámetro de la tubería.....	48
Figura 16. Cálculo de resistividad.....	49
Figura 17. Tramo de Tubería.....	50
Figura 18. Dimensiones estándar y pesos de embalaje.....	55
Figura 19. Diagrama de barras representado el costo del proyecto y de operación.....	65
Figura 20. Diagrama de barras representado el costo del proyecto y de operación.....	69

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Serie electroquímica de los metales.....	23
Tabla 2. Composición de algunos ánodos de sacrificio.....	26
Tabla 3. Densidad de Corriente Requerida.....	51
Tabla 4. Ánodos de sacrificio comúnmente utilizados	51
Tabla 5. Cálculo de la resistencia del cable.....	54
Tabla 6. Anodos con valores de corriente recomendados para una duración de 20 años.	58
Tabla 7. Resultado de los ánodos durante la vida del proyecto.....	60
Tabla 8. Costo de Instalación y Operativos del Sistema de Protección Catódica Mediante rectificadores.....	64
Tabla 9. Sistemas de generación múltiple disponibles, Global Thermoelectric.	66
Tabla 10. Costo de Instalación y Operativos del Sistema de Protección Catódica Mediante Termogeneración.	68

RESUMEN

Título: VIABILIDAD DE UTILIZAR LA TERMOGENERACIÓN A PARTIR DEL FLUIDO TRANSPORTADO POR LOS GASODUCTOS PARA LA ALIMENTACION DE UNIDADES RECTIFICADORAS DE PROTECCION CATÓDICA*

Autor: Carlos Arturo Cano Saavedra**

Palabras Claves: Unidades Rectificadoras, Protección Catódica, Termogeneración, Gasoducto

El aumento en la demanda de combustibles a nivel mundial y la necesidad de llevar estos desde las fuentes de producción hasta la puerta de los consumidores, ha permitido un desarrollo significativo en las últimas décadas en lo que respecta a infraestructura de transporte, a fin de garantizar el suministro continuo y confiable de hidrocarburos. Un aspecto importante en la integridad de las redes es garantizar la calidad y durabilidad de los kilómetros de tuberías, teniendo en cuenta que según la topografía y las condiciones sociales de las zonas por donde se construyen los gasoductos se vuelve preponderante que las tuberías sean enterradas, haciendo de estas un blanco fácil a los ataques de corrosión.

La protección catódica por corrientes termogeneradas usa conceptualmente el mismo principio de protección por corriente impresa, la diferencia radica en el suministro de energía hacia el sistema, la cual se toma de un equipo llamado TEG (Thermo Electric Generators) que aprovecha el fluido transportado en la línea como fuente de combustible para generar electricidad. Dentro de las principales ventajas que tienen los termogeneradores están su alta confiabilidad, mínimo mantenimiento requerido, larga vida útil, fácil instalación, mínimo impacto visual y sonoro, costo inicial y operativo comparativamente bajo dentro de cierto rango de potencia. El rango de potencias donde usualmente resultan la mejor opción es de aproximadamente 30 W a 2000 W. Sin embargo, en ciertos casos este rango se extiende, existiendo instalaciones de 2 W a 5000 W.

Aunque la instalación de un sistema de protección catódica con termogeneración para proyectos con mayores longitudes de tubería normalmente requiere una inversión mayor que un sistema convencional, esta se justifica a mediano plazo por la confiabilidad del sistema y los bajos costos de mantenimiento.

* Monografía para optar al título de Especialista en Ingeniería del Gas

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ing. Eduardo Cristancho Higuera

ABSTRACT

Title: VIABILITY OF USING THERMOELECTRIC TEG (THERMOELECTRIC GENERATOR) FLUID CARRIED BY PIPELINES FOR FEEDING CATHODIC PROTECTION RECTIFIER UNITS*

Author: Cano Saavedra, Carlos Arturo**

keywords: cathodic protection rectifier units, thermoelectric generator, Pipeline.

The increase in fuel demand worldwide and the need to take these from production sources to the door of consumers, has allowed a significant development in recent decades in regard to transport infrastructure, to ensure continuous and reliable supply of oil. An important aspect of network integrity is to ensure the quality and durability of kilometers of pipeline, considering that according to topography and social conditions in the areas where the pipelines are constructed becomes preponderant pipes are buried, making such an easy target to attack by corrosion.

The current cathodic protection termogeneradas used conceptually the same principle of impressed current protection, the difference lies in the power supply to the system, which is taken from a team called TEG (Thermo Electric Generators) that leverages the transported fluid in the line as a fuel source to generate electricity. Among the main advantages of the Thermo Electric Generators we have: high reliability, minimal maintenance required, long life, easy installation, minimal visual impact and low noise, initial cost and comparatively low operating within a certain power range. The best option is the range of power between 30 W to 2000 W, however, in some cases this range extends, existing facilities 2 W to 5000 W.

Although the installation of a cathodic protection with system for Thermo Electric Generators for pipes, usually involves a major investment over conventional system, this is justified by medium-term system reliability and low maintenance costs

* Monografía para optar al título de Especialista en Ingeniería del Gas

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ing. Eduardo Cristancho Higuera

INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda de combustibles a nivel mundial y la necesidad de llevar estos combustibles desde las fuentes de producción hasta la puerta de los consumidores, ha permitido un desarrollo significativo en las últimas décadas en lo que respecta a infraestructura de transporte, a fin de garantizar el suministro continuo y confiable. Teniendo en cuenta la naturaleza y condiciones técnicas del gas natural, es necesario transportarlo en tuberías de acero al carbono, estructuras estas que son susceptibles a los diferentes procesos corrosivos.

Cualquier daño sobre estas líneas de transporte supone riesgos económicos y sociales. Un aspecto importante en la integridad de las redes es garantizar la calidad y durabilidad de los kilómetros de tuberías, teniendo en cuenta que según la topografía de un sitio y las condiciones sociales de las zonas por donde se construyen estos gasoductos se vuelve preponderante que las tuberías sean enterradas, haciendo de estas un blanco fácil a los ataques de corrosión.

En la actualidad la protección a la corrosión en tuberías de acero es realizada por métodos pasivos y activos, siendo los métodos pasivos todos aquellos que permiten reducir la presencia de corrosión generalizada, por ejemplo pinturas, aislamientos, químicos. Por otro lado los métodos activos son aquellos que responden de manera directa en el fenómeno de corrosión tales como protección catódica.

La protección catódica está bastante difundida a nivel mundial y ha demostrado ser eficaz para mantener la integridad de los materiales en lo que respecta a corrosión; no obstante, la implementación de protección catódica en sectores de difícil acceso posibilita la utilización tecnologías diferentes a las de uso convencional, teniendo en cuenta que con frecuencia se presentan sectores que no tienen un sistema de vías de acceso desarrollado y no hay presencia de

redes eléctricas cercanas, haciendo poco viable la posibilidad de cambiar ánodos de sacrificio frecuentemente, así como extender las redes eléctricas hasta estos punto no es factible económicamente, adicional a inconvenientes relacionados con la obtención de permisos por parte de propietarios de predios.

Por lo anterior para aquellos sectores en donde la posibilidad de usar un método convencional de protección catódica es limitado, se recurre a tecnologías confiables y que permitan autogeneración y mantenimiento esporádicos. Una de estas tecnologías son los Termogeneradores, los cuales, no obstante su uso está restringido por el poco conocimiento de su funcionamiento y su viabilidad económica en los proyectos en desarrollo, la presente monografía pretende abarcar de manera resumida el concepto y uso de elementos termogeneradores no sin antes abordar los conceptos asociados a la corrosión y la descripción breve de la diferentes formas de protección catódica utilizadas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las unidades rectificadoras de protección catódica son las responsables del suministro adecuado de corriente hacia los ánodos instalados, con los cuales, el gasoducto es protegido contra el efecto de la corrosión, permitiendo una mayor vida útil y una mayor seguridad de los sistemas de transporte. Estos rectificadores son instalados en los gasoductos los cuales operan con energía suministrada por redes eléctricas. La confiabilidad en la alimentación de los rectificadores se ve en ocasiones afectada por fallas en el fluido eléctrico, oposición de propietarios de predios para la construcción de facilidades y acometidas, o por acciones vandálicas contra acometidas y transformadores.

Ante este problema se pretende estudiar otra tecnología que utiliza como fuente generadora de energía para alimentar las unidades rectificadoras el fluido que se transporta por la tubería (Temogeneración), la cual ha sido implementada con éxito en otros países.

2. JUSTIFICACION

La protección catódica ha demostrado ser eficaz para mantener la integridad de los materiales en lo que respecta a corrosión; no obstante, su implementación en sectores de difícil acceso es limitada, teniendo en cuenta que con frecuencia se presentan sectores que no cuentan con vías de acceso, no hay presencia de redes eléctricas cercanas, adicional a inconvenientes relacionados con la obtención de permisos de predios y de tipo social en general. Esto posibilita la utilización de tecnologías diferentes a las de uso convencional, que sean confiables y que permitan autogeneración y mantenimiento esporádico, entre las cuales se encuentra la termogeneración, cuyo uso está restringido por el poco conocimiento de su funcionamiento y su viabilidad económica en los proyectos en desarrollo.

El uso de la tecnología basada en la termogeneración para la alimentación de unidades rectificadoras de protección catódica (URPC) no ha incursionado ampliamente en Colombia, haciendo relevante conocer el sistema en aras de que las empresas operadoras y/o propietarias de infraestructuras de transporte de gas natural se familiaricen con sus bondades y su funcionamiento, ventajas-desventajas, relación costo-beneficio y otras cualidades frente a la tecnología convencional con energía eléctrica.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la viabilidad de utilizar la termogeneración a partir del fluido transportado por los gasoductos, para la alimentación de unidades rectificadoras de protección catódica, en sistemas de corriente impresa.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer los conceptos básicos de los Sistemas de Protección Catódica (SPC)
- Describir las fuentes de energía eléctrica establecidas para los SPC
- Describir los principios de funcionamiento de los Termogeneradores
- Analizar los costos asociados a los Termogeneradores.
- Comparación de costos entre un sistema convencional de energía y los Termogenerados.
- Duración y vida útil de los sistemas de Termogeneración.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 CORROSIÓN

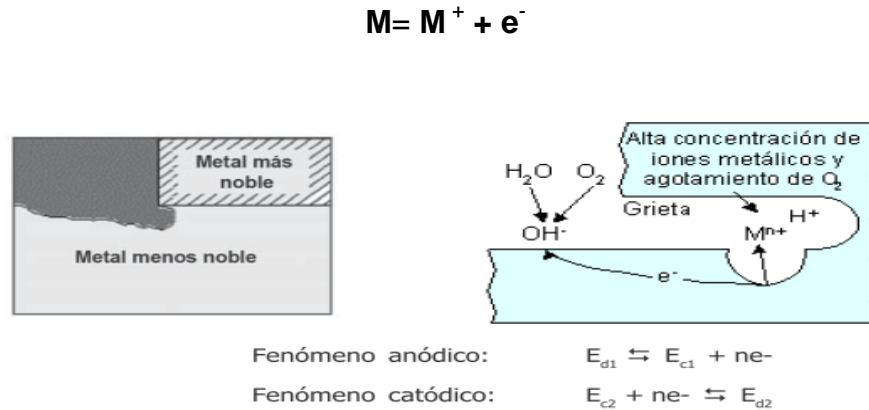
Corrosión es un proceso de destrucción de metales y aleaciones que ocurre de forma espontánea sobre la superficie de los mismos. «Corrosión es la destrucción de un cuerpo sólido causada por un ataque no provocado de naturaleza química o electroquímica que se inicia en la superficie» [1, 2].

Esta es la definición más generalmente aceptada, originaria del «Reichanschuss für Metallschutz». En cualquier caso, la corrosión es un proceso destructivo en lo que a ingeniería se refiere, y representa una enorme pérdida económica.

Se designa químicamente corrosión por suelos, a los procesos de degradación que son observados en estructuras enterradas. La intensidad dependerá de varios factores tales como el contenido de humedad, composición química, pH del suelo, etc. En la práctica suele utilizarse comúnmente el valor de la **resistividad eléctrica** del suelo como índice de su agresividad; por ejemplo un terreno muy agresivo, caracterizado por presencia de iones tales como cloruros, tendrá resistividades bajas, por la alta facilidad de transportación iónica.

Se puede decir que, exceptuando los procesos de corrosión a alta temperatura, todos los demás se producen en presencia de agua, por medio de un mecanismo electroquímico de intercambio de electrones. En la Figura 1 se puede explicar este mecanismo de una forma muy sencilla mediante la siguiente expresión:

Figura 1. Corrosión y mecanismo de la corrosión.



Fuente: LOPEZ, V. "Técnicas de laboratorio"; ed Edunsa; 2ª edición, Octubre 1994

En la que M representa el metal en estado inmune que al perder uno o varios electrones, pasa a ión metálico M^+ capaz de reaccionar con el medio acuoso que le rodea.

La presencia de agua no sólo aparece alrededor de una tubería sumergida, sino también en tuberías enterradas, por humedad de la tierra, y en la superficie de las tuberías que se encuentran al aire, por condensación y salpicaduras.

Si no existen niveles de protección adecuados, se propicia el fenómeno de corrosión en estos defectos, originando fallas inesperadas en las tuberías, incrementando a su vez los costos de mantenimiento y reparación, así como la disminución en la seguridad durante la operación, tanto para los trabajadores como para las comunidades cercanas a las instalaciones de ductos.

De lo anteriormente expuesto, se deduce que, para atenuar o evitar la corrosión de un metal rodeado por un electrolito acuoso, podríamos utilizar dos métodos: el

primero contempla la posibilidad de evitar el contacto del metal con el electrolito, cubriéndolo con un material impermeable y aislante, se habrá impedido la formación de pilas de corrosión, por eliminación del electrolito; no obstante, por muy buenas características que tenga un revestimiento, no es posible conseguir un aislamiento total entre el metal y el medio que le rodea, ya que siempre quedarán pequeñas zonas de metal al descubierto, producidas por porosidad, grietas e impactos sobre el revestimiento.

Estas pequeñas zonas de metal desnudo, actuarán como ánodos, frente al resto de la superficie metálica recubierta, dando lugar a un proceso de corrosión muy rápido, concentrado en estas pequeñas zonas, en las que pronto aparecerán taladros producidos por corrosión, consiguiendo que todos los puntos de la superficie metálica se conviertan en cátodo de una determinada pila, el metal no perderá electrones y, por lo tanto, permanecerá inmune a la corrosión. Este concepto da idea del segundo método para combatir la corrosión, que es la ***protección catódica***.

4.2 PROTECCIÓN CATÓDICA

Es el método de prevención y mitigación de la corrosión más usado. En principio, es posible reducir o prevenir la corrosión de cualquier metal o aleación expuesto a un electrolito acuoso. La corrosión puede ser reducida a cero y la protección es de carácter indefinido si se cuida el mantenimiento. No es aplicable para el control de la corrosión atmosférica, dado que no es posible sumergir el ánodo en una fina capa de humedad.

Fue utilizada por primera vez en los 1820s por los británicos para la protección de las piezas de cobre en barcos. Hasta los 1920s no empezó a

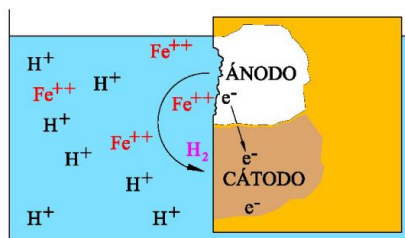
usarse en forma extensiva en las conducciones de gas enterradas en pozos petrolíferos de EEUU.

Las formas de corrosión que pueden ser controladas son: corrosión general, corrosión por picaduras, grafitización, corrosión en hendiduras, corrosión bajo tensión, corrosión/fatiga, cavitación, corrosión bacteriana.

La protección catódica consiste en convertir en cátodo toda la superficie metálica a proteger, consiguiendo que por toda ella penetre corriente continua. Por medio de una corriente eléctrica aplicada exteriormente, la corrosión se reduce virtualmente a cero y se puede mantener una superficie metálica en un medio corrosivo, sin sufrir deterioro durante un tiempo indefinido.

Cuando un metal se está corroyendo tiene áreas anódicas y catódicas. Cuando se produce un fenómeno de corrosión generalizada, ello es debido a que la pequeña diferencia de potencial de las micro pilas, permitiendo que al formarse óxido sobre el ánodo éste se pasiva lo suficiente para pasar a ser catódico frente a otra zona. Al alternarse las situaciones anódicas y catódicas el ataque es prácticamente uniforme.

Figura 2. Representa un par ánodo-cátodo situado en el mismo trozo de metal sumergido.



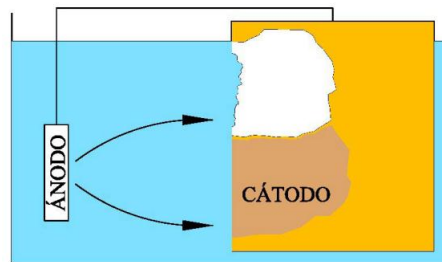
Fuente: LOPEZ, V. "Técnicas de laboratorio"; ed Edunsa; 2ª edición, Octubre 1994

se observa que a través del metal existe un flujo de electrones del ánodo al cátodo (véase Figura 2), flujo este que es el que permite que se forme la corrosión. El sentido convencional de la corriente, inverso al de los electrones, es, pues, a través del metal del cátodo al ánodo, y en el electrólito sale corriente continua por el ánodo y entra por el cátodo.

En definitiva, se ve que en las zonas por las que hay flujo electrolítico del metal al electrólito (Zonas anódicas) hay corrosión, y en las zonas en las que penetra los electrones del electrólito al metal (los cátodos) hay protección

Tal como señala la Figura 3, para lograr la protección catódica se une el conjunto de ánodos y cátodos a un ánodo exterior que aportará los electrones requeridos por el medio, los cuales son capaces de suministrar la suficiente corriente para que penetre por toda la superficie a proteger.

Figura 3. Protección Catódica.



Fuente: LOPEZ, V. "Técnicas de laboratorio"; ed Edunsa; 2ª edición, Octubre 1994

Se puede decir que la corriente que circulaba por el metal y salía del antiguo ánodo al electrólito, se ve ahora forzada por la presencia del ánodo de la protección catódica a seguir por el conductor, desapareciendo este antiguo ánodo que ahora actúa catódicamente.

4.3 TIPOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Para conseguir la protección catódica se necesita conectar con la estructura a proteger algún elemento que tenga una diferencia de potencial con la misma, suficiente para hacer circular la corriente en el sentido deseado.

Al unir eléctricamente dos metales de distinto potencial electroquímico, estando ambos rodeados del mismo electrolito (tierra, agua de mar, agua dulce, etc.) se establecerá entre ellos una pila galvánica, en la que el metal con carácter más electronegativo (ánodo) cederá electrones al metal más electropositivo, protegiéndose éste a expensas de la corrosión del primero.

Teniendo en cuenta la Serie Electroquímica de los metales, un metal tendrá carácter anódico con relación a otro, si se encuentra por encima de él en esta serie. Así, por ejemplo, el hierro será anódico respecto al cobre y catódico respecto al zinc (Véase Tabla N.º 1). El metal que actúa como ánodo se sacrifica a favor del que actúa de cátodo. El Electrodo de referencia es el del hidrógeno normal:

Tabla 1. Serie electroquímica de los metales

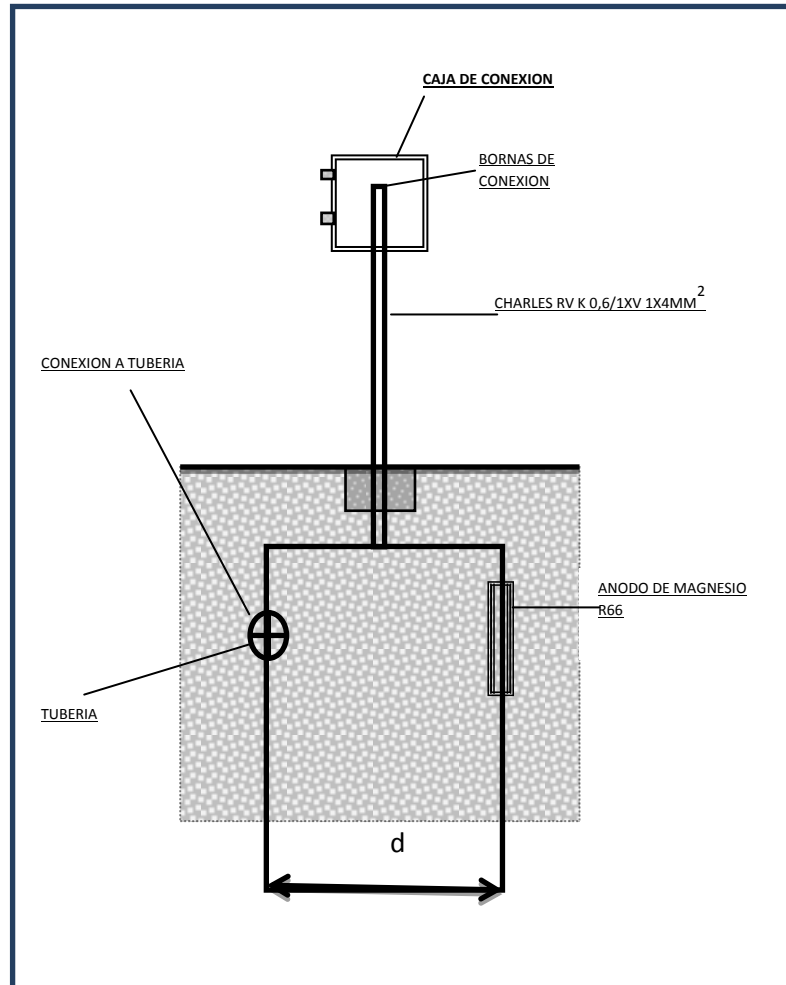
iones en solución	Potencial (voltios)	iones en solución	Potencial (voltios)
Li ⁺	- 3022	Co ⁺⁺	- 0,29
Rb ⁺	- 2924	Ni ⁺⁺	- 0,22
K ⁺	- 2925	Sn ⁺⁺	- 0,136
Ca ⁺⁺	- 2,87	Pb ⁺⁺	- 0,129
Na ⁺	- 2715	H ⁺	0,000
Mg ⁺⁺	- 1866	Bi ⁺⁺⁺	+ 0,226
Al ⁺⁺⁺	- 1,67	Cu ⁺⁺	+ 0,344
Zn ⁺⁺	- 0,762	Te ⁺⁺⁺	+ 0,558
Cr ⁺⁺	- 0,71	Hg ⁺⁺	+ 0,798
Fe ⁺⁺	- 0,441	Ag ⁺	+ 0,799
Cd ⁺⁺	- 0,397	Pt ⁺⁺	+ 1,2
Ti ⁺	- 0,336	Au ⁺⁺⁺	+ 1,12

Fuente: www.wilsonwalton.es/hts/tf-2.pdf.

4.4 PROTECCIÓN POR ÁNODOS DE SACRIFICIO

Si se conecta un trozo de hierro cuyo potencial es de -0.441 V, con un trozo de zinc cuyo potencial es de -0.762 V, la diferencia existente establecerá una corriente eléctrica a través del electrolito, del zinc (ánodo) al hierro (cátodo). Estamos realizando la protección catódica del hierro sacrificando un trozo de zinc. Este método se denomina protección catódica por ánodos de sacrificio y se consigue uniendo el metal a proteger con otro que sea más electronegativo que él en la Tabla 1.

Figura 4. Protección Catódica con Ánodo de sacrificio



Fuente: Control de la corrosión, CENIM 1989

Se observa que la diferencia de potencial de que se dispone, según Figura 4, es de 320 mV, que divididos por la resistencia eléctrica del circuito da la intensidad disponible.

En realidad los potenciales de la Tabla 1 se dan en unas circunstancias y electrólitos especiales (Potenciales Normales de disolución de NERNST) y en la realidad, deben usarse las series galvánicas de los metales y aleaciones en los medios (electrólitos) en que realmente se encuentren.

Desde el punto de vista técnico y económico, un ánodo tiene que reunir una serie de propiedades esenciales como las siguientes:

- Tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo para polarizar la estructura (en el caso del acero a $-0,8$ V).
- El material debe tener un elevado rendimiento eléctrico en A/h kg.
- El ánodo deberá corroerse uniformemente.
- El metal será de fácil adquisición y deberá poder fundirse en diferentes formas y tamaños.
- El metal deberá tener un costo razonable, de modo que unido con otras características electroquímicas se pueda conseguir la protección a un costo razonable por amperio/año.

4.5 CAMPOS DE UTILIZACIÓN DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO

Los ánodos de sacrificio más comúnmente empleados son los formados por aleaciones de zinc, magnesio y aluminio. La norma A.S.T.M.- B6-46 y la especificación norteamericana U.S. Mil-A 18001 H define la composición para ánodos de aleación de zinc, magnesio y aluminio; Tabla 2.

Tabla 2. Composición de algunos ánodos de sacrificio

Propiedad	Ánodo de zinc	Ánodo de Magnesio	Ánodo de aluminio		
	MIL-A 18001-H	MIL-A 24412-A	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Composición %	Cd = 0,025 - 0,15 Al = 0,10 - 0,50 Fe = 0,005 máx. Pb = 0,006 máx. Cu = 0,005 máx. Si = 0,125 máx.	Cu = 0,1 máx. Al = 5 - 7 Si = 0,3 máx. Fe = 0,003 máx. Mn = 0,15 mín. Ni = 0,003 máx. Zn = 2 - 4 Otros = 0,3 máx.	Si = 0,11 - 0,21 Fe = 0,10 máx. Zn = 0,3 - 0,5 Sn = --- Mg = --- Hg = 0,02 - 0,05 In = --- Cu = 0,006 máx. Otros = 0,02 máx.	Si = 0,10 máx. Fe = 0,13 máx. Zn = 3,5 - 5,0 Sn = -- Mg = 0,3 - 0,8 Hg = -- In = 0,02 - 0,05 Cu = 0,006 máx. Otros = 0,02 máx.	0,10 máx. Fe = 0,13 máx. Zn = 4 - 5 Sn = 0,08 - 0,16 Mg = --- Hg = --- In = --- Cu = 0,01 máx. Otros = 0,02 máx.
Rendimiento	0.95	0.5	0.95	0.9	0.5

Fuente: La Protección Catódica y sus aplicaciones. Corrosión y Protección Vol.1, 1988.

4.5.1 Zinc

El valor relativamente elevado de su potencial de disolución implica un alto rendimiento de corriente, una disminución muy controlada del potencial de la estructura a proteger y una alcalinización muy pequeña del medio en contacto con esa estructura.

Uno de los factores que más puede limitar la utilización del zinc es la resistividad del medio agresivo, y por ello es aconsejable que su empleo quede limitado para resistividades inferiores a los 1000 Ω cm.

También debe cuidarse su utilización en presencia de aguas dulces a temperaturas por encima de 65°C ya que en estas condiciones puede invertir su polaridad y hacerse catódico con relación al acero, o en todo caso quedar pasivado por los carbonatos precipitados.

Como ánodo de sacrificio se utiliza masivamente, sobre todo para la realización de la protección catódica en agua de mar: buques, pantalanés, andenes marítimos, refuerzos metálicos, diques flotantes, boyas, plataformas petrolíferas, depósitos de agua, condensadores, etc. También se utiliza en suelos de baja resistividad.

4.5.2 Aluminio

Por su situación en la serie electroquímica, el aluminio es el metal más idóneo para la realización de la protección catódica, intermedio entre el zinc y el magnesio, con una elevada capacidad de corriente (Tabla II). Su utilización es en el campo naval, su elevada capacidad de corriente hace que un solo ánodo de aluminio pueda ejercer la acción de tres de zinc de iguales características para una misma duración del ánodo. Estas circunstancias han motivado que estos ánodos estén siendo muy utilizados para la protección catódica de tanques de lastre y carga-lastre de petroleros.

Aunque el precio del aluminio es algo más elevado que el del zinc, al necesitar menos ánodos, esta diferencia se compensa; pero además si se considera el ahorro en mano de obra de colocación de los ánodos, el aluminio puede llegar incluso a ser más económico. El campo de utilización de estos ánodos es, en principio, semejante al de los de zinc, siendo su comportamiento altamente satisfactorio en la protección catódica de estructuras sumergidas en aguas dulces, sobre todo el de la aleación Al-In (aluminio-Indio) de la cual se tiene una gran experiencia.

4.5.3 Magnesio

El magnesio es un elemento muy reactivo lo que implica una capacidad de proporcionar una densidad de corriente elevada, a costa de consumirse con gran rapidez.

Por ello su principal aplicación es en el caso de ánodos enterrados en suelos de resistividades más elevadas (2000 a 5000 Ω x cm).

Otro importante campo de aplicación son los acumuladores de agua caliente sanitaria aunque suele limitarse a depósitos pequeños y bien revestidos.

4.5.4 Otros materiales

Teniendo en cuenta la serie electroquímica, y el hecho de que es preciso alear algunos elementos para que sirvan como ánodos de sacrificio, existen otros materiales que también se utilizan para determinadas aplicaciones.

Como por ejemplo, el hierro para proteger cobre o acero inoxidable en casos especiales; o los metales que se utilizan para la fabricación de baterías.

4.6 ÁNODOS ENTERRADOS

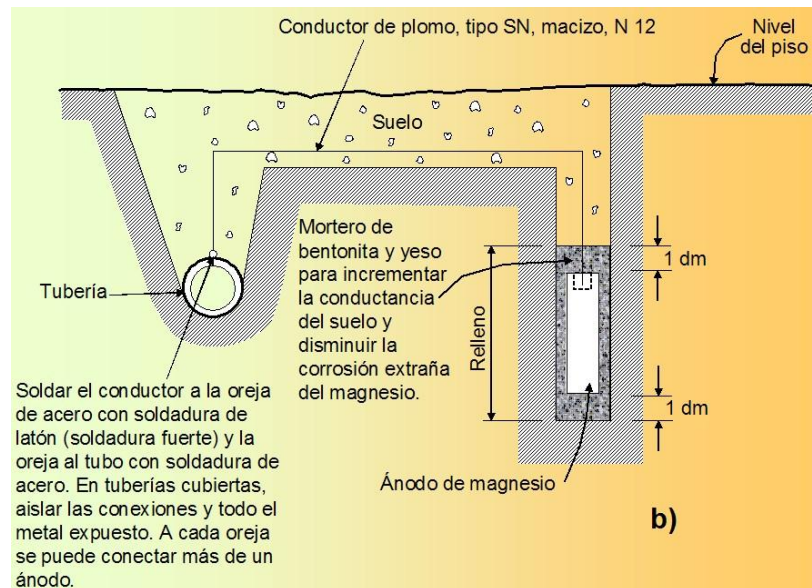
Cuando un ánodo de sacrificio se utiliza para la protección de una estructura enterrada conviene asegurarse que trabajará en las mejores condiciones (véase Figura 5). En general los ánodos suelen rodearse con mezcla activadora (formada por una combinación de bentonita, yeso y sales); Con ello se consiguen tres objetivos:

- a) Aumentar la superficie de contacto con el terreno.
- b) Mantener un cierto grado de humedad alrededor del ánodo.
- c) Evitar la pasivación del ánodo con el paso del tiempo.

La utilización de mezcla activadora es fundamental en ánodos enterrados, pudiendo tan solo instalarse sin backfill para resistividades muy bajas en terrenos anegados.

Los ánodos de sacrificio no deben utilizarse para proteger tuberías enterradas si las necesidades de corriente son elevadas y si el suelo tiene una resistividad elevada.

Figura 5. Instalación típica con ánodo de sacrificio



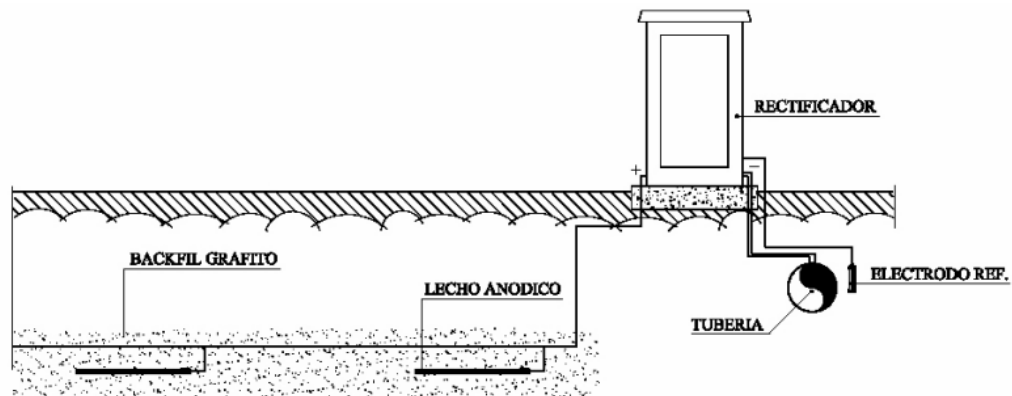
Fuente: http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_5_5.html

4.7 PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA

La característica fundamental de un sistema de corriente impresa es que la fuente de energía para proteger la estructura es externa. Generalmente se trata de rectificadores de corriente continua.

Lógicamente, la ventaja de esta opción es que puede controlarse exteriormente la fuente de alimentación. La instalación consiste en conectar el negativo del rectificador a la estructura a proteger y el positivo al lecho de ánodos (Ver Figura 6).

Figura 6. Protección Catódica con corriente impresa.



Fuente: Control de la corrosión, CENIM 1989

4.8 TIPOS DE ÁNODOS

Se distingue entre ánodos consumibles y permanentes. En realidad todos los ánodos se gastan en cierta manera con el flujo de corriente. Se consideran permanentes aquellos ánodos cuya pérdida de material por corrosión es despreciable.

- Ánodos consumibles son, principalmente, Fe y Al.
- Ánodos permanentes son, Grafito, FeSi, PbAg, TiPt, Ti Metal Mixed Oxides, (MMO) cerámicos, tántalo platinado, etc.

Los ánodos consumibles se utilizan al ser su costo inferior, y ser fácilmente sustituibles. Sirva de ejemplo la protección catódica de buques en armamento para lo que se suelen sumergir en el mar trozos de chatarra de gran disponibilidad en los astilleros conectados al positivo del rectificador.

En ocasiones también se utilizan Rieles u otro tipo de chatarra enterrándolos, aunque los gastos de obra civil para su sustitución no hacen rentable el sistema si la intensidad a disipar es importante (véase Figura 7).

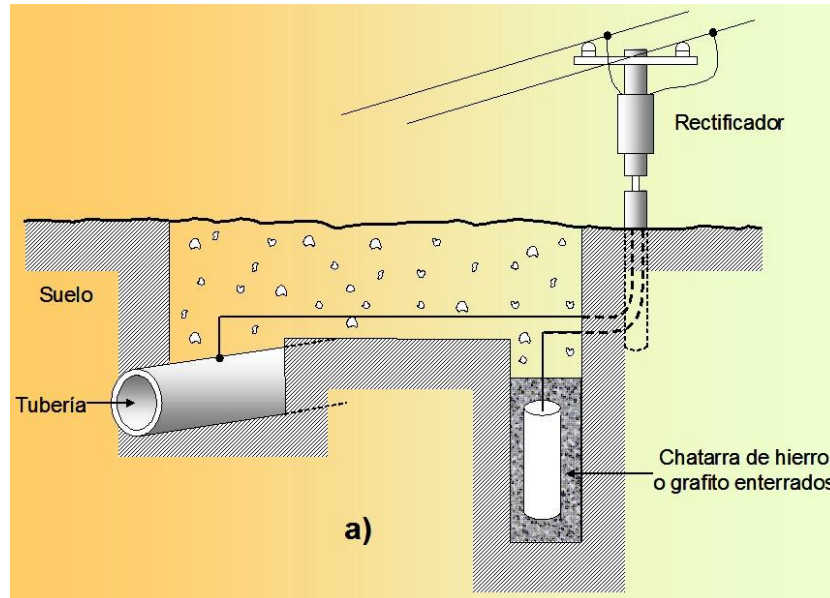
También se utilizan ánodos consumibles de aluminio en corriente impresa, en algunas aplicaciones en agua dulce caliente. Realizando la protección catódica de un depósito metálico, se consigue además un segundo efecto de tratamiento electrolítico del agua con los productos de corrosión del aluminio, la protección contra la corrosión e incrustación de las tuberías de galvanizado del resto del circuito.

En general, los ánodos más utilizados son los de tipo permanente. En instalaciones enterradas se suelen utilizar de titanio MMO, ferrosilicio o grafito, rodeados de un backfill que mejora sus condiciones de trabajo. (El backfill es un tipo de carbono que mejora la superficie de contacto, reduce la resistencia con el terreno y permite la difusión de los gases producidos en las reacciones anódicas).

Cuando los ánodos están sumergidos no llevan backfill y suelen emplearse de titanio-platinado, tántalo-platinado, plomo-plata, plomo-platino, ferrosilicio o titanio

MMO. También se utilizan ánodos continuos de polímeros y carbono, aunque tienen poca capacidad de salida de corriente.

Figura 7. Instalación típica con corriente impresa



Fuente: http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_5_5.html

4.9 PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTES TERMOGENERADAS

La protección catódica por corrientes termogeneradas usa conceptualmente el mismo principio de protección por corrientes impresa y vagabundas, la diferencia radica en el suministro de energía hacia el sistema. Básicamente la generación de energía necesaria para suministrar la corriente se toma de un equipo llamado TEG por sus siglas en inglés (Thermo Electric Generators) el cual aprovecha el fluido transportado en la línea como fuente de combustible para generar electricidad. En la actualidad este fenómeno es bien conocido y utilizado desde los años 60s en proyectos de la NASA; no obstante, su aplicación se ha visto justificada en el sector petrolero debido a la necesidad de proteger gasoductos que por

condiciones topográficas no es posible implementar métodos convencionales de protección catódica confiables.

La función de los TEG se basa en la aplicación de fenómenos termoeléctricos; y más concretamente en los módulos termoeléctricos que permiten el aprovechamiento del calor para convertirlo en electricidad.

Los módulos termoeléctricos, se han mejorado y optimizado en determinados aspectos constructivos como son: las uniones soldadas; la utilización de buenos aislantes eléctricos con buena conductividad térmica, mejora en la composición de los termoelementos, etc. Los módulos termoeléctricos actuales no se pueden comparar con los primeros módulos prácticamente construidos como prototipos de laboratorio en los años 50 y 60 del siglo pasado [3] [4]. En un apartado de [5] se puede ver un resumen de los diferentes procesos constructivos en la fabricación de módulos termoeléctricos, y cómo han evolucionado en las últimas 4 décadas desde la fabricación prácticamente manual a la utilización de robots para mejorar la precisión y la calidad de las uniones soldadas cuando las secciones transversales de los termoelementos son muy pequeñas [6]. Todas estas modificaciones han posibilitado una mejora en la eficiencia de los módulos así como un abaratamiento de los costes de producción y ha permitido a la tecnología termoeléctrica entrar en diferentes campos industriales comenzando a ser competitiva con respecto a otras tecnologías.

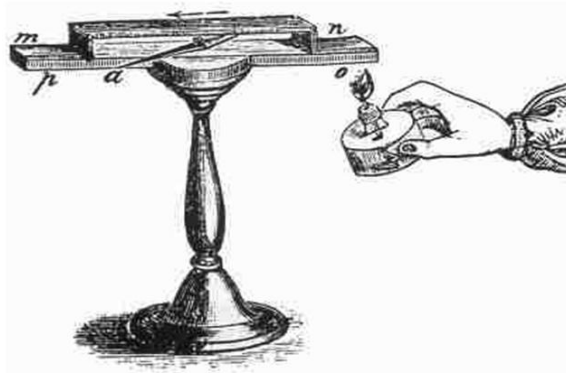
Tanto es así que en los años 50 o 60 del siglo pasado, las aplicaciones termoeléctricas estaban restringidas al sector militar y aeroespacial debido al elevado coste de los materiales termoeléctricos. Sin embargo, hoy en día su uso se ha extendido a otros muchos campos, sector sanitario, industrial, automóvil, etc.

El diseño de cualquier aplicación termoeléctrica conlleva, desde el punto de vista térmico, el estudio de dos grandes problemas muy relacionados entre sí. Por un lado estaría el estudio de los fenómenos termoeléctricos en los semiconductores (efecto Seebeck, efecto Thomson y efecto Peltier) que debemos tener en cuenta en el diseño del módulo termoeléctrico; y por otro lado la influencia de los efectos irreversibles (efecto Fourier y el efecto Joule)

5. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA DE LA TERMOCLECTRICIDAD

La Termoelectricidad se considera como la rama de la termodinámica superpuesta a la electricidad donde se estudian los fenómenos en los que intervienen el calor y la electricidad, el fenómeno más conocido es el de electricidad generada por la aplicación de calor a la unión de dos materiales diferentes. Si se unen por ambos extremos dos alambres de distinto material (este circuito se denomina termopar), y una de las uniones se mantiene a una temperatura superior a la otra, surge una diferencia de tensión que hace fluir una corriente eléctrica entre las uniones caliente y fría. Este fenómeno fue observado por primera vez en 1821 por el físico alemán **Thomas Seebeck**, y se conoce como efecto **Seebeck**, Figura 8.

Figura 8. Esquema del experimento realizado por Thomas Seebeck



Fuente: *E.M. Avery. Elements of Natural Philosophy, Sheidon and Co, 1885, pág. 294*

Para una pareja de materiales determinada, la diferencia de tensión es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas. Esta relación puede emplearse para la medida precisa de temperaturas mediante un termopar en el que una de las uniones se mantiene a una temperatura de referencia conocida (por ejemplo, un baño de hielo) y la otra se coloca en el lugar cuya temperatura quiere medirse. A temperaturas moderadas (hasta unos 260 °C) suelen emplearse combinaciones de hierro y cobre, hierro y constantan (una aleación de

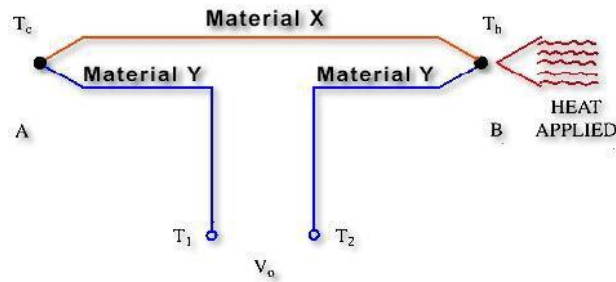
cobre y níquel), y cobre y constatan. A temperaturas mayores (hasta unos 1.650 °C) se utiliza platino y una aleación de platino y rodio. Como los alambres de los termopares pueden tener dimensiones muy pequeñas, también permiten medir con precisión las temperaturas locales en un punto. La corriente generada puede aumentarse empleando semiconductores en lugar de metales, y puede alcanzarse una potencia de unos pocos vatios con eficiencias de hasta el 6%. Estos generadores termoeléctricos, calentados con quemadores de queroseno, son muy utilizados en zonas remotas de Rusia para alimentar receptores de radio.

Cuando se hace pasar una corriente por un circuito compuesto de materiales diferentes cuyas uniones están a la misma temperatura, se produce el efecto inverso. En este caso, se absorbe calor en una unión y se desprende en la otra. Este fenómeno se conoce como efecto **Peltier** en honor al físico francés **Jean Peltier**, que lo descubrió en 1834. Es posible usar sistemas de semiconductores basados en el efecto **Peltier** como refrigeradores para aplicaciones especiales. Aunque se considera como descubridor del efecto termoeléctrico a Seebeck, al revisar los estudios de A. Volta se ha constatado que en sus trabajos pioneros sobre electricidad midió diferencias de potencial debidas a la termoelectricidad al usar contactos entre diversos metales, sin embargo no prestó demasiada atención a dicho efecto.

5.1 EL EFECTO SEEBECK [7]

Para explicar el efecto Seebeck utilizaremos un circuito con un simple termopar tal y como se muestra en la Figura 10. El termopar está construido con dos metales diferentes, que en la figura se denominan material X y material Y. En una aplicación de medida de temperatura el termopar A se utiliza como referencia, por lo que se mantiene a una temperatura T_c . El termopar B se usa para medir la temperatura

Figura 9. Efecto Seebeck



Fuente: N. Ashcroft, N. Mermin, Solid State Physics, 1976

De interés T_h , que en este ejemplo será superior a T_c . Con la temperatura a la que se halla sometido el termopar B, aparece una diferencia de potencial entre los puntos T_1 y T_2 . Esta tensión V_0 se conoce como f.e.m de Seebeck y se puede expresar como una serie de potencias de la diferencia de temperatura entre el foco caliente, T_h , y el foco frío, T_c :

$$V_{ab} = C_1 (T_h - T_c) + \frac{C_2}{2} (T_h - T_c)^2 + \frac{C_3}{3} (T_h - T_c)^3$$

El coeficiente de Seebeck se define en función de la variación del voltaje con la temperatura como:

$$\alpha_{ab} = \frac{\partial V_{ab}}{\partial T_h} = C_1 + C_2 (T_h - T_c) + C_3 (T_h - T_c)^2$$

5.2 EL EFECTO PELTIER [7]

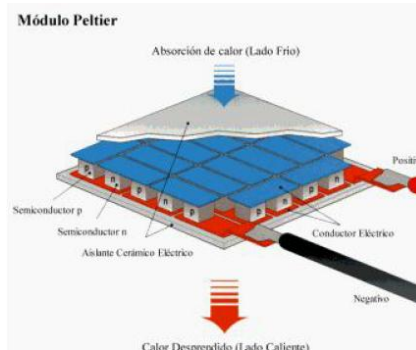
Este efecto puede considerarse como el inverso del efecto Seebeck y consiste en que al hacer pasar corriente eléctrica a través de la unión de dos conductores distintos en una determinada dirección produce enfriamiento, y al hacerla pasar en dirección contraria produce calentamiento en la unión (véase figura 11). La potencia calorífica generada o absorbida es proporcional a la corriente eléctrica y también depende de la temperatura de la unión y se expresa como:

$$Q_p = \pi I$$

En donde:

- Q_p es la potencia calorífica generada o absorbida debido al efecto Peltier.
- π es el coeficiente de Peltier.
- I es la intensidad de corriente que pasa a través de la unión.

Figura 10. Efecto Peltier



Fuente: <http://www.hardside.com.ar/utills/peltier.htm>

Por la primera ley de Kelvin tenemos: $\pi = \alpha T$ en donde: α es el coeficiente de Seebeck de dos conductores distintos. T es la temperatura absoluta en la unión.

5.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

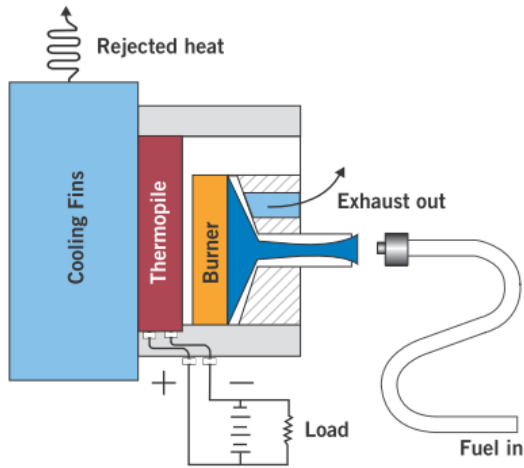
De los fenómenos descritos anteriormente el que es de interés para el desarrollo de este trabajo es el efecto Seebeck y por lo tanto a continuación se explicara su funcionamiento.

Un generador termoeléctrico convierte directamente calor en electricidad. El calor induce la circulación de una corriente eléctrica al fluir desde el quemador de gas a través del módulo termoeléctrico (termopila). Para generar electricidad mediante el efecto termoeléctrico se necesitan un módulo termoeléctrico y una diferencia de temperatura entre ambas caras del mismo. Dado que la circulación de corriente también genera migración de calor, las fuentes caliente y fría deberán aportar y disipar calor continuamente para mantener esa diferencia. En la práctica los elementos básicos de los generadores termoeléctricos son tres (Figura 11):

- Fuente caliente: quemador o calefactor catalítico a gas en casi todos los casos.
- Dispositivo de conversión de energía: módulo termoeléctrico o termopila.
- Fuente fría: disipador de aluminio aletado, tubos refrigerantes o radiadores.

Los elementos termoeléctricos generan en una tensión muy baja (mV) pero suelen tener una buena capacidad de corriente. Por ejemplo, en el caso de las termocuplas usadas en los dispositivos de seguridad de llama domiciliarios la corriente generada en base a la llama piloto es suficiente para mantener la válvula de seguridad abierta, oponiéndose al resorte que tiende a cerrarla.

Figura 11. Esquema de representación de un elemento TEG.



Fuente: <http://www.globalte.com/>

Un módulo termoeléctrico o termopila consiste generalmente en varios elementos semiconductores (a veces cientos de ellos) con dopaje P y N (ver Anexo 1) conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Los generadores se completan con diversos sistemas auxiliares, como son los de gestión de combustible, ajuste de aire, seguridad, encendido y acondicionamiento de la tensión de salida.

El corazón de los generadores termoeléctricos es el módulo termoeléctrico. Se han ensayado e incluso construido generadores con diversas mezclas de materiales semiconductores (con sus correspondientes dopajes P y N); los cuales pueden ser:

- Antimonio-zinc
- Silicio-germanio
- Bismuto-telurio
- Plomo-estaño-telurio

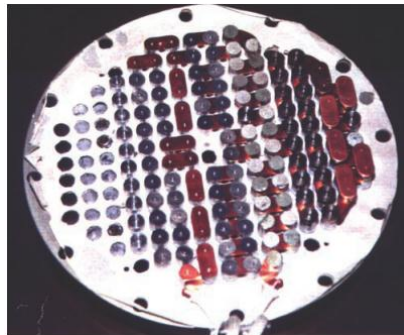
Respecto de la fuente de calor, hay sistemas catalíticos o de quemador convencional, casi siempre a gas, ya sea natural, licuado o de boca de pozo. Actualmente alrededor del 95% del mercado mundial se satisface con generadores a quemador convencional (no catalítico) alimentado a gas y termopilas selladas de plomo-estaño-telurio.

Las ventajas de estas tecnologías son:

1. Quemador vs. Calentador catalítico. El quemador permite desarrollar temperaturas mucho más altas, presenta una resistencia superior a impurezas en el gas y tiene mayor vida útil (hasta 20 años según el caso).
2. Material y tecnología del módulo termoelectrico. Los módulos de Pb-Sn-Te sellados e inertizados trabajan a mayor temperatura que las termopilas abiertas, con mayor durabilidad (por estar inertizadas), densidad de potencia y eficiencia (debido al mayor salto térmico).

La Figura 12 muestra una termopila de Pb-Sn-Te a medio construir; genera 120 W a 6.7 V y cuenta con 80 termocuplas (160 elementos). Cada termocupla genera 84 mV, con una corriente de 18 A y con una temperatura de 540°C en la cara caliente y 140°C en la fría.

Figura 12. Termopila en construcción



Fuente: Eduardo Bollati, Revista Petrotecnia 2007 pag. 84

En general, los generadores termoeléctricos modernos tienen las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas

- Altísima confiabilidad, funcionamiento continuo y en todo clima, sin necesidad de refugios.
- Mínimo mantenimiento, típicamente 1 a 2 horas anuales (no tienen partes móviles).
- No requieren mayor calificación del personal de operación o mantenimiento.
- Larga vida útil, de hasta 20 años sin recambio de componentes importantes, dependiendo de la tecnología utilizada.
- Fácil instalación, generalmente sin necesidad de equipos de izaje dado su bajo peso unitario.
- Mínimo impacto visual y sonoro.
- Costo inicial y operativo comparativamente bajo dentro de cierto rango de potencia.

Desventajas

- Costo por watt relativamente alto, si bien en el rango de potencia habitual da un costo inicial competitivo.
- Eficiencia relativamente baja, aunque en el rango de potencia habitual da un consumo generalmente moderado.

El rango de potencias donde usualmente resultan la mejor opción es de aproximadamente 30 W a 2000 W. Sin embargo, en ciertos casos este rango se extiende, existiendo instalaciones de 2 W a 5000 W.

5.4 COMPARACIÓN CON OTRAS TECNOLOGÍAS

5.4.1 Redes eléctricas

La confiabilidad de las extensiones de redes eléctricas en áreas remotas suele ser muy baja, no siendo suficiente para sistemas críticos. Los generadores termoeléctricos tienen en general una confiabilidad mucho mayor.

Los costos de capital y cargos por servicio asociados al tendido de líneas eléctricas hasta áreas remotas suelen ser prohibitivos, a menos que la distancia a cubrir sea muy corta. La instalación de un generador termoeléctrico para satisfacer la demanda de energía localizada es, en general, una solución más económica.

5.4.2 Grupos electrógenos convencionales

El costo de capital de los grupos electrógenos a gas o diesel es generalmente menor que el de un generador termoeléctrico pero su costo operativo y los costos de las instalaciones auxiliares requeridas suelen ser mucho mayores.

La necesidad de contar con un técnico calificado para realizar el mantenimiento periódico de los grupos implica costos operativos muy elevados, mayores tiempos de equipo parado y menor confiabilidad general. Cuando se comparan los costos globales a lo largo del ciclo de vida, incluyendo todos los costos operativos, los generadores termoeléctricos, dentro de su rango de potencia, tienen costos operativos menores y mayor confiabilidad.

5.4.3 Sistemas fotovoltaicos

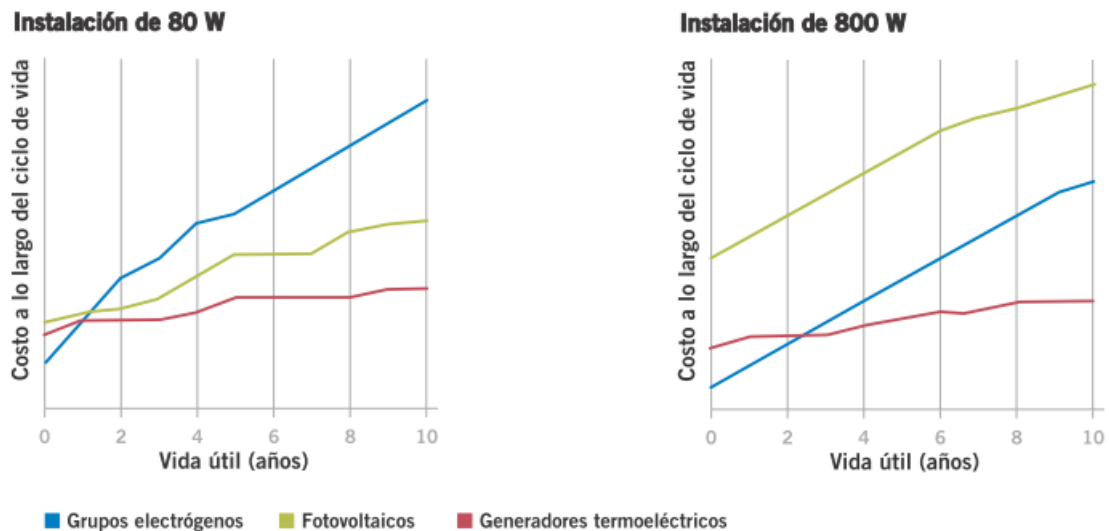
La simplicidad inherente de los sistemas fotovoltaicos los hace, en general, más convenientes para cargas muy pequeñas (hasta aproximadamente 30 W continuos). Sin embargo, en algunos casos se usan generadores termoeléctricos

en este rango de potencia debido a la muy pobre irradiación solar o al vandalismo que típicamente sufren los sistemas fotovoltaicos.

Para potencias mayores en general los costos iniciales son menores para los TEG. El mantenimiento de los TEG es típicamente menor (no requieren limpieza periódica como los paneles) y los costos operativos son usualmente menores (con gas natural) o similares (con propano). En general, el costo del propano como combustible para los sistemas de termogeneración es del mismo orden de magnitud que el prorrateo de los reemplazos de los bancos de batería que los sistemas fotovoltaicos suelen necesitar a lo largo de su vida útil.

Por último, para cargas de 150 W continuos o mayores la diferencia en impacto visual y planta ocupada a favor de los TEG es marcada, ya que requieren mucho menos espacio.

Figura 13. Sistemas Fotovoltaicos



Fuente: Eduardo Bollati, Revista Petrotecnia 2007 pag. 84

6. CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LA PROTECCIÓN CATÓDICA EN TUBERIAS ENTERRADAS

La proyección de un sistema de protección catódica requiere de la investigación de características respecto a la estructura a proteger, y al medio.

6.1 RESPECTO A LA ESTRUCTURA A PROTEGER

- a) Material de la estructura.
- b) Especificaciones y propiedades del revestimiento protector (si existe).
- c) Características de construcción y dimensiones geométricas.
- d) Mapas, planos de localización, diseño y detalles de construcción.
- e) Localización y características de otras estructuras metálicas, enterradas o sumergidas en las proximidades.
- f) Información referente a los sistemas de protección catódica, los característicos sistemas de operación, aplicados en las estructuras aledañas.
- g) Análisis de condiciones de operación de líneas de transmisión eléctrica en alta tensión, que se mantengan en paralelo o se crucen con las estructuras enterradas y puedan causar inducción de la corriente.
- h) Información sobre todas las fuentes de corriente continua, en las proximidades y pueden originar corrosión.
- i) Sondeo de las fuentes de corriente alterna de baja y media tensión, que podrían alimentar rectificadores de corriente o condiciones mínimas para la utilización de fuentes alternas de energía.

6.2 RESPECTO AL MEDIO

Luego de disponer de la información anterior, el diseño será factible complementando la información con las mediciones de las características de campo como:

- a) Mediciones de la resistividad eléctrica a fin de evaluar las condiciones de corrosión a que estará sometida la estructura.
- b) Definir sobre el tipo de sistema a utilizar; galvánico o corriente impresa y, escoger los mejores lugares para la instalación de ánodos.
- c) Mediciones del potencial Estructura-Electrólito, para evaluar las condiciones de corrosividad en la estructura, así mismo, detectar los problemas de corrosión electrolítica; (esto aplica para estructura ya protegidas).
- d) Determinación de los lugares para la instalación de ánodo bajo los siguientes principios:
 - Lugares de baja resistividad.
 - Distribución de la corriente sobre la estructura.
 - Accesibilidad a los sitios para montaje e inspección

6.3 EJERCICIO PRÁCTICO DE APLICACIÓN

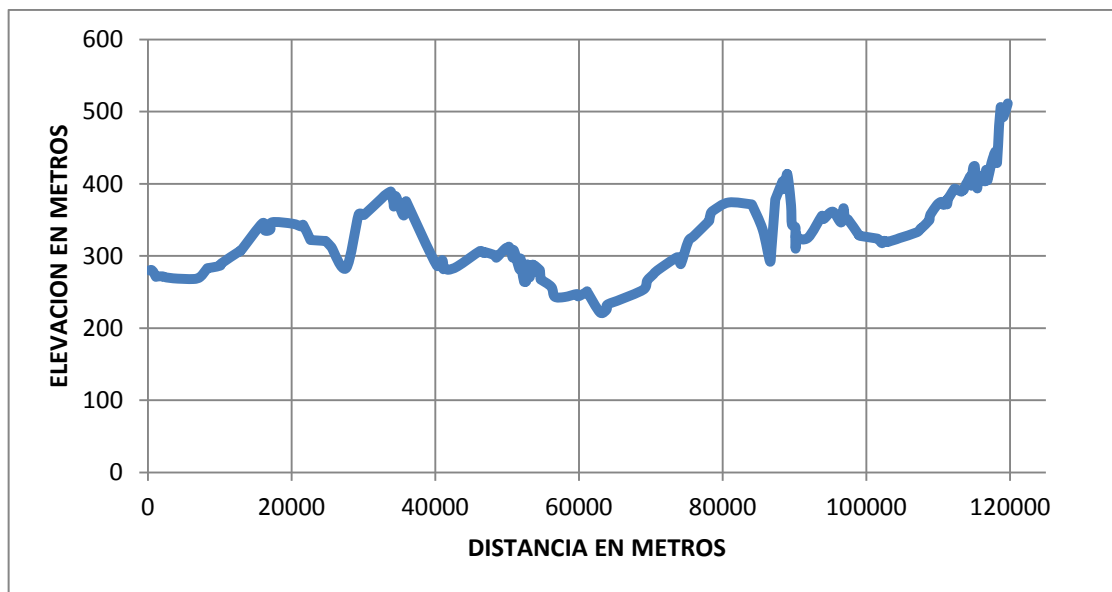
A continuación se desarrollará un ejercicio de protección catódica que aplicará la teoría antes mencionada. Este ejercicio permitirá comparar tecnologías convencionales de protección catódica vs. uso de termogeneradores.

6.4 DESCRIPCION DEL EJERCICIO

Se requiere transportar a una población gas natural para consumo residencial; no obstante esta misma población tiene una termoeléctrica cercana que distribuye energía durante todo el año a la red de distribución nacional. Además de los anteriores consumos esta población es reconocida por su actividad industrial, actividad que depende en mayor medida del suministro de gas.

El consumo promedio es del orden de 90 MMSCFD, el punto más cercano de suministro de gas se encuentra a más de 100 km, el estudio de viabilidad del trazado arrojó el siguiente perfil topográfico:

Figura 14. Perfil Topográfico

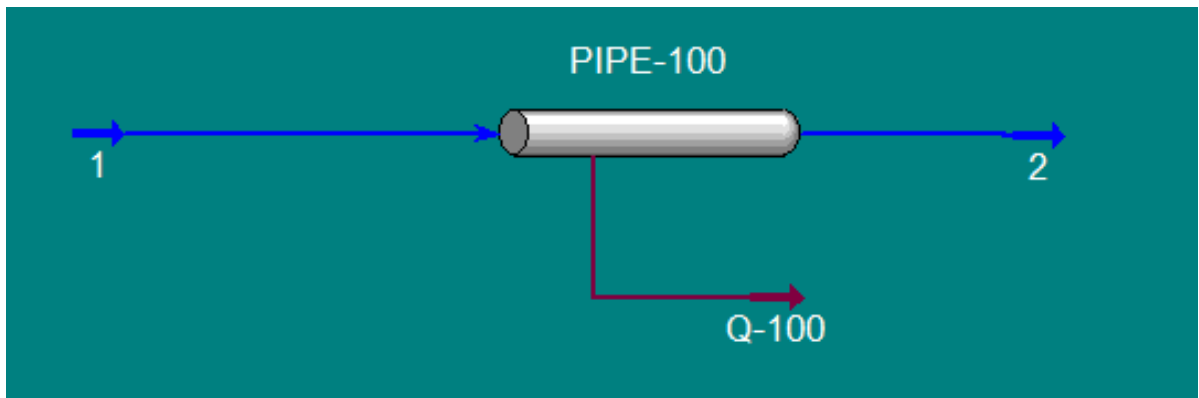


Fuente: Información tomada de Inspección en Línea realizada por Rosen en el 2009, sector Casanare-Meta.

Con base en la anterior topografía y teniendo en cuenta que el consumo se presenta al final de los 120 km, se procede al cálculo del diámetro de la tubería, así mismo se realiza el cálculo de espesores correspondientes usando los

parámetros de la norma B31.8. Como dato de entrada se toma una presión de suministro de 1000 psig y una presión de entrega de 400 psig.

Figura 15. Cálculo del diámetro de la tubería



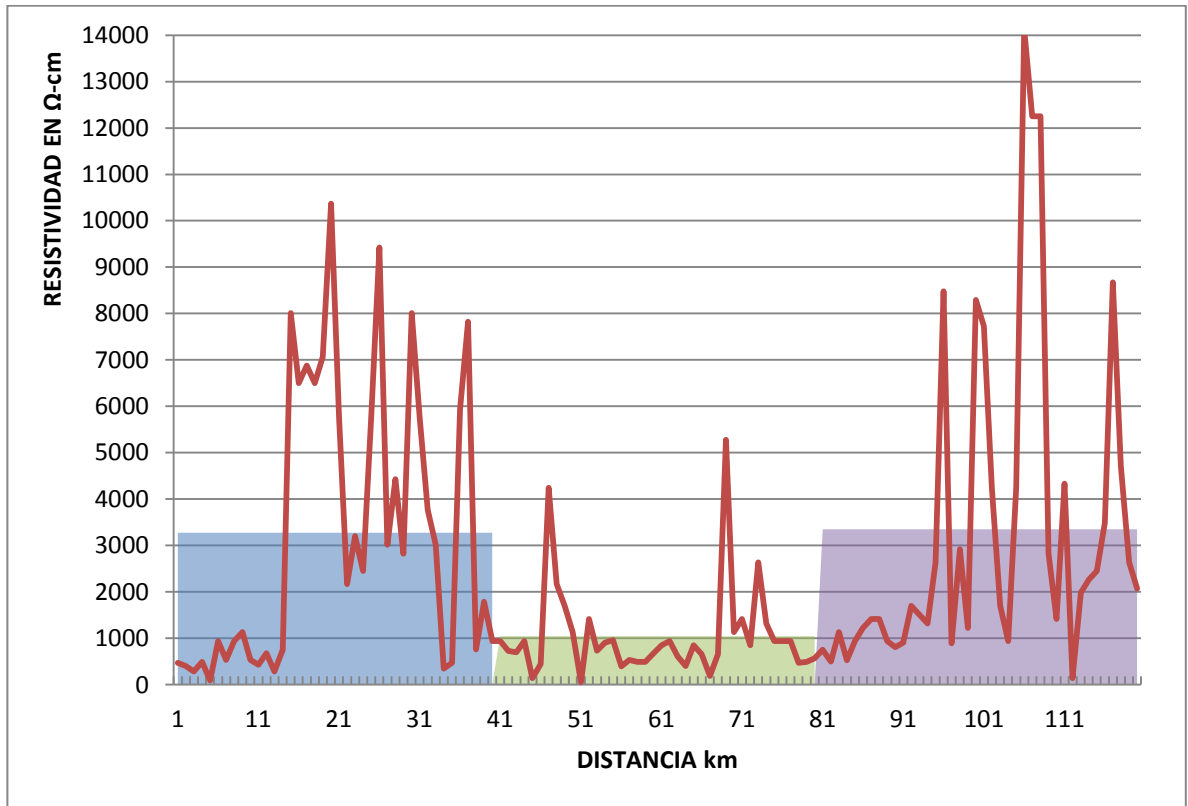
Fuente: El Autor

Los cálculos realizados utilizando la herramienta Hysys arrojan:

- Diámetro de tubería 16".
- Caudal $Q=90$ MMSCFD.
- Espesor (factor de diseño 0.72; corrosión permitida 1/8); 0,403.

Los cálculos de resistividad realizados en campo para el perfil topográfico se resumen en el siguiente gráfico.

Figura 16. Cálculo de resistividad



Fuente: El Autor

Las franjas de colores representan el promedio para cada 40 km de longitud, dato que será usado en el cálculo de protección catódica.

6.4.1 Resistividad del terreno

La resistividad fue calculada según el capítulo 5 y expresada en forma resumida como se presenta en la grafica anterior, los datos a usar en los siguientes cálculos:

K0 a K40	3277 Ω -cm
K40 a K80	1048 Ω -cm
K80 a K120	3351 Ω -cm

6.4.2 Área de protección

Teniendo en cuenta que el gasoducto se divide en 3 partes iguales, el área de cálculo para cada uno de los tramos es la misma según el siguiente cálculo:

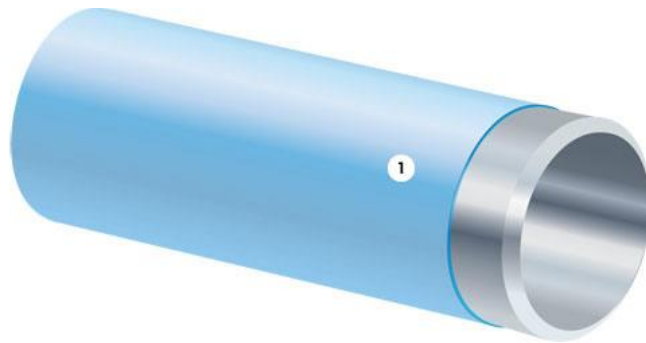
$$A = 2\pi rL = 2\pi \left(\frac{8}{12}\right) * 0,3048 * 40000 = 51070 \text{ m}^2$$

6.4.3 Tipo de recubrimiento

El recubrimiento a usar para proteger la tubería enterrada será Fusion Bonded Epoxy (FBE). Este tipo de recubrimiento permite proteger la tubería de forma adecuada; no obstante, para efectos de diseño se contempla que a corto y largo plazo las superficies expuestas a la corrosión sumadas sean menores al 3% de toda el área de la tubería, de esta manera el diseño de protección catódica para la tubería contempla un área de 1532 m² por cada tramo de 40 km del gasoducto.

$$\text{Area a proteger} = 51070\text{m}^2 * 3\% = 1532\text{m}^2$$

Figura 17. Tramo de Tubería



Fuente: El Autor

6.5 PROTECCION CATODICA CON ANODOS DE SACRIFICIO

6.5.1 Densidad de Corriente requerida

Tabla 3. Densidad de Corriente Requerida

ESTRUCTURA	DENSIDAD DE CORRIENTE (mA / pie ²)
Tuberías	1 - 2
Paredes de pozos profundos	1
Fondo de tanques parte externa	1
Parte interna de tanques	5 - 10
Tanques de proceso	7 - 10
Estructuras en agua de mar	5 - 15
Estructuras en zonas pantanosas	1 - 2

Fuente www.docentes.unal.edu.co/napinzonc/docs/proteccion%20catodica.pdf.

Teniendo en cuenta que la recomendación para tuberías debe estar entre 1 y 2 mA/ft², se usará el valor medio de 1.5 mA/ft², de esta manera la corriente requerida para cada tramo de 40 km es:

$$DC = 1,5 \frac{mA}{ft^2} * 1532 m^2 * \frac{(1 ft)^2}{(0,3048 m)^2} = 16491 mA = 16,5 A$$

6.5.2 Selección de material Anódico

Los ánodos de sacrificio más comúnmente usados son los que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4. Ánodos de sacrificio comúnmente utilizados

CARACTERISTICA	Mg H-1	Mg High Potential	Cinc
Potencial (Cu/CuSO 4)	-1.55	-1.75	-1.10
Eficiency de corriente (%)	25-50	50	90
Salida de corriente real (A-hr/lb)	250-500	500	335
Salida de corriente teorica (A-hr/lb)	1000	1000	372
Perdida de peso real (lb/A-año)	35-17.5	17.5	26.2

Fuente: www.docentes.unal.edu.co/napinzonc/docs/proteccion%20catodica.pdf.

Como recomendación general se tiene un tipo de material anódico según sea la resistividad del terreno; así para resistividades hasta de 1500 Ω -cm se recomienda el uso de ánodos de Zinc y para resistividades de mayores a 1500 Ω -cm y hasta 6000 Ω -cm se recomienda el uso de ánodos de magnesio.

Por lo anterior el material seleccionado para servir como ánodos de sacrificio es:

K0 a K40	Magnesio
K40 a K80	Zinc
K80 a K120	Magnesio

De acuerdo a la Norma NACE Standard No RP-01, el potencial requerido para protección catódica es un potencial negativo de al menos -0,85 voltios medido entre la estructura y un electrodo de referencia de cobre sulfato de cobre en contacto con el electrolito. Un potencial el cual sea menor que -0,85 voltios puede ser corrosivo.

6.5.3 Cálculo de la resistencia del sistema

La resistencia del sistema puede ser calculada de dos maneras. La primera como la sumatoria de las resistencias individuales:

$$R_T = R_a + R_c + R_w$$

$R_T =$ Resistencia total

$R_a =$ Resistencia del anodo

$R_c =$ Resistencia del catodo

$R_w =$ Resistencia del cable

Otra manera de calcular la resistencia del sistema es mediante la ley de Ohm:

$$R_T = \frac{\Delta E}{I}$$

ΔE

= Diferencia de voltaje entre el potencial requerido y el potencial del ánodo

$\Delta E =$ Corriente requerida

Para los ánodos de sacrificio de magnesio high potential

$$R_T = \frac{-0,85 \text{ volt} - (-1,75 \text{ volt})}{16,5 \text{ A}} = \frac{0,9 \text{ volt}}{16,5 \text{ A}} = 0,055 \Omega$$

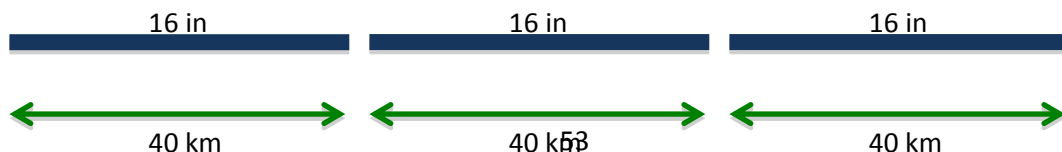
Para los ánodos de sacrificio de Zinc

$$R_T = \frac{-0,85 \text{ volt} - (-1,10 \text{ volt})}{16,5 \text{ A}} = \frac{0,25 \text{ volt}}{16,5 \text{ A}} = 0,015 \Omega$$

6.5.4 Cálculo de la resistencia del cátodo

La resistencia de cátodo es calculada para cada tramo de tubería asumiendo que al final de la vida útil el revestimiento del cátodo tendrá una resistencia no mayor a 2000 ohm-ft² siendo consecuentes con el 3% de superficie descubierta.

$$R_C = \frac{\text{Resistencia del recubrimiento ohm-ft}^2}{\text{Area superficial de la tubería ft}^2} = \frac{2000}{51070 \text{ m}^2 * \frac{(1 \text{ ft})^2}{(0,3048 \text{ m})^2}} = 0,0036 \Omega$$



6.5.5 Cálculo de la resistencia del cable

Tabla 5. Cálculo de la resistencia del cable

Calibre AWG No	Resistencia W/100 m	Amperaje Máximo (A)*			Dimensiones	
		TIPO DE CABLE			Diám. mm	Area cm ²
		UF	USE, THW TW, THWN	NM		
4/0	0,01669	211	248		13,412	1,4129
3/0	0,02106	178	216		11,921	1,1161
2/0	0,02660	157	189		10,608	0,8839
1/0	0,03346	135	162		9,462	0,7032
2	0,05314	103	124		7,419	0,4322
4	0,08497	76	92		5,874	0,2710
6	0,1345	59	70		4,710	0,1742
8	0,2101	43	54		3,268	0,0839
10	0,3339	32	32	30	2,580	0,0523
12	0,5314	22	22	20	2,047	0,0329
14	0,8432	16	16	15	1,621	0,0206

Fuente: <http://www.enalmex.com/docpdf/libro/ch08.pdf.pdf>

Teniendo en cuenta que la corriente máxima del sistema es 16.5A aproximadamente se selecciona un calibre de 3/0 AWG. Para una longitud de conexión de máximo 20 m, la resistencia del cable es:

$$R_w = 0,02106 \frac{ohm}{100 m} * 20 m = 0,0042 ohm$$

6.5.6 Cálculo de la resistencia del ánodo

Una vez calculadas las resistencias del sistema, se procede a determinar la resistencia del ánodo:

$$R_T = R_a + R_c + R_w$$

- Para el ánodo de magnesio: $0,055 = R_a + 0,0036 + 0,0042$

$$R_a = 0,055 - (0,0036 + 0,0042); R_a = 0,0472 \text{ ohm}$$

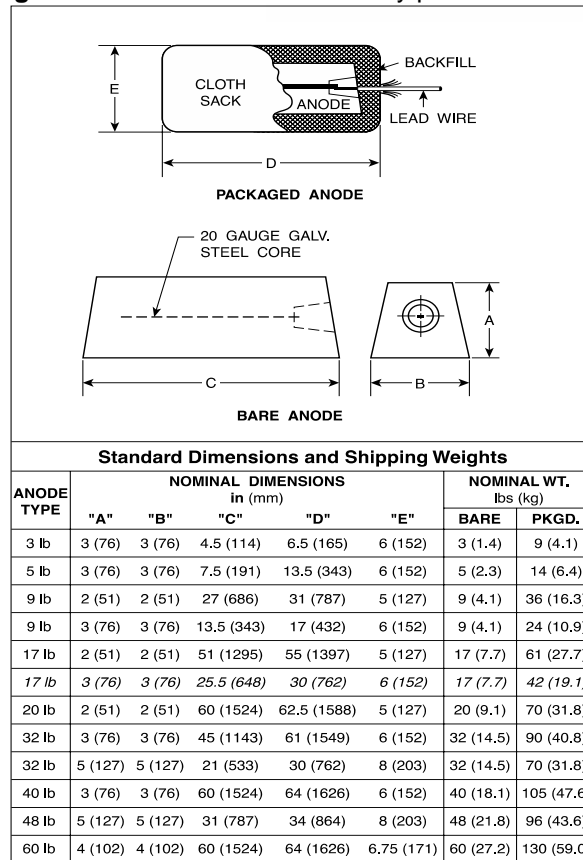
- Para el ánodo de Zinc: $0,015 = R_a + 0,0036 + 0,0042$

$$R_a = 0,015 - (0,0036 + 0,0042); R_a = 0,0072 \text{ ohm}$$

6.5.7 Numero de ánodos requeridos

De la tabla siguiente seleccionamos un ánodo de 60 lb:

Figura 18. Dimensiones estándar y pesos de embalaje



Fuente: Kemal Nisancioglu. Cathodic Protection. Rev. Material Performance, diciembre 1984.

$$N = \left(\frac{0,0052\rho}{R_a * L} \right) \left(\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right)$$

ρ : resistividad del terreno (ohm – cm)

R_a : resistencia del anodo (ohm)

L : longitud del anodo (ft)

d : diámetro del anodo (ft)

- Para el tramo 1:

$$N = \left(\frac{0,0052 * 3277 \text{ ohm} - \text{cm}}{0,0472 \text{ ohm} * 5,33\text{ft}} \right) \left(\ln \left(\frac{8 * 5,33\text{ft}}{0,561\text{ft}} \right) - 1 \right) = 225$$

- Para el tramo 2:

$$N = \left(\frac{0,0052 * 1048 \text{ ohm} - \text{cm}}{0,0072 \text{ ohm} * 5,33\text{ft}} \right) \left(\ln \left(\frac{8 * 5,33\text{ft}}{0,561\text{ft}} \right) - 1 \right) = 473$$

- Para el tramo 3:

$$N = \left(\frac{0,0052 * 3351 \text{ ohm} - \text{cm}}{0,0472 \text{ ohm} * 5,33\text{ft}} \right) \left(\ln \left(\frac{8 * 5,33\text{ft}}{0,561\text{ft}} \right) - 1 \right) = 231$$

No obstante; se debe calcular con la vida útil del sistema el Número de ánodos y de los dos cálculos tomar el mayor:

$$N = \frac{8760 * Y * I}{w * C * U}$$

w : peso de cada anodo (lb)

C : Salida de corriente real (A-hr/lb)

U : factor de uso en decimales (0,85)

Y : Vida util de la protección (20 años)

I : Corriente de protección (A)

Tramo 1 y 3: $N = \frac{8760 * 20 * 16.5}{60 * 500 * 0,85} = 113$

Tramo 2:
$$N = \frac{8760 \cdot 20 \cdot 16.5}{60 \cdot 335 \cdot 0.85} = 170$$

En conclusión usamos:

Tramo 1: 225 ánodos de Magnesio de 60 lb cada uno espaciados una distancia de:

$$\text{Espaciamiento} = \frac{40000 \text{ m}}{225} = 178 \text{ m}$$

Tramo 2: 473 ánodos de Zinc de 60 lb cada uno espaciados una distancia de:

$$\text{Espaciamiento} = \frac{40000 \text{ m}}{473} = 85 \text{ m}$$

Tramo 3: 231 ánodos de Magnesio de 60 lb cada uno espaciados una distancia de:

$$\text{Espaciamiento} = \frac{40000 \text{ m}}{231} = 174 \text{ m}$$

Tramo 3: 219 ánodos de Magnesio de 60 lb cada uno espaciados una distancia de:

$$\text{Espaciamiento} = \frac{40000 \text{ m}}{219} = 184 \text{ m}$$

6.6 PROTECCION CATÓDICA USANDO CORRIENTE IMPRESA

En la tabla siguiente se presentan los ánodos usualmente usados para protección catódica por corriente impresa. La tabla presenta el valor de corriente recomendado para una duración de 20 años.

En nuestro ejercicio usaremos ánodos de grafito de 35 lb, el cual tiene una corriente recomendada de 2 A.

6.6.1 Numero de ánodos requeridos

Teniendo en cuenta que en el apartado 6.2.1 se calculó la corriente necesaria para proteger la estructura de 40 km, el número de ánodos se calcula así:

$$N = \frac{I (\text{corriente de protección})}{i (\text{máxima corriente por anodo})} = \frac{16,5 A}{2 A} = 8,25 = 9 \text{ Anodos}$$

Tabla 6. Anodos con valores de corriente recomendados para una duración de 20 años.

ANODE TYPE	ANODE SIZE (INCHES)	ANODE WT (lbs)	CANISTER SIZE (INCHES)	MAX AMPS FOR 20 YR.LIFE
HSCI Tube	1.1 X 9	1	3 X 18	0.1
HSCI Tube	2.0 X 9	5	4 X 18	0.4
HSCI Rod	1.5 X 60	25	6 X 84	1.0
HSCI Rod	2.0 X 60	44	6 X 84	2.0
HSCI Tube	2.2 X 42	23	8 X 60	1.5
HSCI Tube	2.2 X 84	46	8 X 90	3.0
GRAP Rod	3.0 X 30	13	6 X 42	0.4
GRAP Rod	3.0 X 60	27	6 X 84	0.8
GRAP Tube	3.0 X 30	13	8 X 42	0.5
GRAP Tube	3.0 X 60	27	8 X 84	1.0
GRAP Tube	4.0 X 40	35	10 X 48	2.0
GRAP Tube	4.0 X 80	70	10 X 90	4.0
PMO-TI Rod	1/8 X 24	-1	3 X 30	0.5
PMO-TI Rod	1/8 X 48	-1	3 X 60	1.0
PMO-TI Rod	1/4 X 24	-1	3 X 30	1.0
PMO-TI Rod	1/4 X 48	-1	3 X 60	2.0
PMO-TI Rod	1/8 X 72	-1	3 X 84	1.5
PMO-TI Rod	1/4 X 72	-1	3 X 84	3.0

Fuente: Kemal Nisancioglu. Cathodic Protection. Rev. Material Performance, diciembre 1984.

Cálculo del número de ánodos tomando como base el tiempo de vida proyectado:

$$N = \frac{Y * I}{W} = \frac{20 \text{ años} * 16,5 A}{35 lb} = 9,43 = 10 \text{ Anodos}$$

Verificación del numero de ánodos resultado de escoger una resistencia máxima de 2 ohm para los ánodos:

$$N = \frac{\rho * \kappa}{L * \left(Ra - \frac{\rho * P}{S} \right)}$$

ρ : resistividad del terreno (ohm – cm)

K: relación L/d

Ra : resistencia del anodo (ohm)

L : longitud del anodo (ft)

P : Factor que depende del No. de ánodos

S : Distancia entre ánodos

Tramo 1

$$N = \frac{3277 * 0,014}{4 * \left(2 - \frac{3277 * 0,00201}{12} \right)} = 7,9 = 8 \text{ Anodos}$$

Tramo 2

$$N = \frac{1048 * 0,014}{4 * \left(2 - \frac{1048 * 0,00201}{12} \right)} = 2,01 = 3 \text{ Anodos}$$

Tramo 3

$$N = \frac{3351 * 0,014}{4 * \left(2 - \frac{3351 * 0,00201}{12}\right)} = 8,15 = 9 \text{ Anodos}$$

En conclusión se define que para cada tramo se usarán 10 ánodos de sacrificio resultado de la proyección de la vida del proyecto.

Tabla 7. Resultado de los ánodos durante la vida del proyecto

L/d	K	L/d	K
5	0.014	20	0.0213
6	0.015	25	0.0224
7	0.0158	30	0.0234
8	0.0165	35	0.0242
9	0.0171	40	0.0249
10	0.0177	45	0.0255
12	0.0186	50	0.0261
14	0.0194	55	0.0266
16	0.0201	60	0.0270
18	0.0207		
Notes: L = Effective anode length D=anode/backfill diameter			

Number Of Anodes (N)	Factor (P)	Number Of Anodes (N)	Factor (P)
2	0.00261	14	0.00168
3	0.00289	16	0.00155
4	0.00283	18	0.00145
5	0.00268	20	0.00135
6	0.00252	22	0.00128
7	0.00237	24	0.00121
8	0.00224	26	0.00114
9	0.00212	28	0.00109
10	0.00201	30	0.00104
12	0.00182		

Fuente: Kemal Nisancioglu. Cathodic Protection. Rev. Material Performance, diciembre 1984.

6.6.2 Pre-cálculo de la potencia del rectificador.

La potencia del rectificador se puede estimar con base en la corriente calculada de protección y las resistencias promedio de los ánodos, de esta forma, la potencia del rectificador debe ser:

$$Potencia = I^2R = 16,5^2 * 2 = 544,5 \text{ Watt}$$

El anterior cálculo demuestra que la potencia es demasiado alta y por lo tanto se deberán distribuir en al menos 2 subtramos de 20 km cada uno con una corriente de protección de 8.25 A.

$$Potencia = I^2R = 8,25^2 * 2 = 136,1 \text{ Watt}$$

6.6.3 Resistencia del ánodo

La resistencia del ánodo se calcula teniendo en cuenta que cada tramo se subdividirá en dos tramos iguales cada uno con 5 Anodos de sacrificio a partir de la siguiente ecuación:

$$Ra = \frac{\rho * \kappa}{N * L} + \left(\frac{\rho * P}{S} \right)$$

Tramo 1 y 1a

Para efectos de reducir la resistencia del ánodo con el electrolito, se usará una cama anódica que permite reducir la resistividad del terreno a 1500 ohm-cm:

$$Ra = \frac{1500 * 0,014}{5 * 4} + \left(\frac{1500 * 0,00201}{12} \right) = 1,3$$

Tramo 2 y 2a

$$Ra = \frac{1048 * 0,014}{5 * 4} + \left(\frac{1048 * 0,00201}{12} \right) = 0,91$$

Tramo 3 y 3a

Para efectos de reducir la resistencia del ánodo con el electrolito, se usará una cama anódica que permite reducir la resistividad del terreno a 1500 ohm-cm:

$$Ra = \frac{1500 * 0,014}{5 * 4} + \left(\frac{1500 * 0,00201}{12} \right) = 1,3$$

6.6.4 Resistencia total.

La resistencia total será la suma de cada una de las resistencias del circuito, en apartados anteriores se calculó la resistencia debida al cátodo y al conductor.

Tramo 1 y 1^a: $Rt = Ra + Rc + Rw = 1,3 + 0,0036 + 0,0042 = 1,31 \text{ ohm}$

Tramo 2 y 2^a: $Rt = Ra + Rc + Rw = 0,91 + 0,0036 + 0,0042 = 0,92 \text{ ohm}$

Tramo 3 y 3^a: $Rt = Ra + Rc + Rw = 1,3 + 0,0036 + 0,0042 = 1,31 \text{ ohm}$

6.6.5 Voltaje para cada tramo.

Tramo 1 y 1^a: $V = 1,5 * I * Rt = 1,5 * 8,25 * 1,31 = 16,2 \text{ v}$

Tramo 2 y 2^a: $V = 1,5 * I * Rt = 1,5 * 8,25 * 0,92 = 11,31$

Tramo 3 y 3^a: $V = 1,5 * I * Rt = 1,5 * 8,25 * 1,31 = 16,2$

6.6.6 Potencia del rectificador para cada tramo.

$$Potencia = I^2 R$$

Tramo 1 y 1ª $Potencia = 1,5 * (8,25^2 * 1,31) = 134 \text{ Watt}$

Tramo 2 y 2ª: $Potencia = 1,5 * (8,25^2 * 0,92) = 94 \text{ Watt}$

Tramo 3 y 3ª: $Potencia = 1,5 * (8,25^2 * 1,31) = 134 \text{ Watt}$

6.6.7 Selección de los Rectificadores

Tramo 1 y 1a : 150 watts @ 9 A (dos rectificadores); se aproxima de 134 W a 150, y de 8.25 a 9 A).

Tramo 2 y 2a : 100 watts @ 9 A (dos rectificadores)

Tramo 3 y 3ª : 150 watts @ 9 A (dos rectificadores)

6.7 COSTOS DE INSTALACIÓN Y OPERATIVOS DEL SISTEMA DE PROTECCION CATÓDICA MEDIANTE RECTIFICADORES

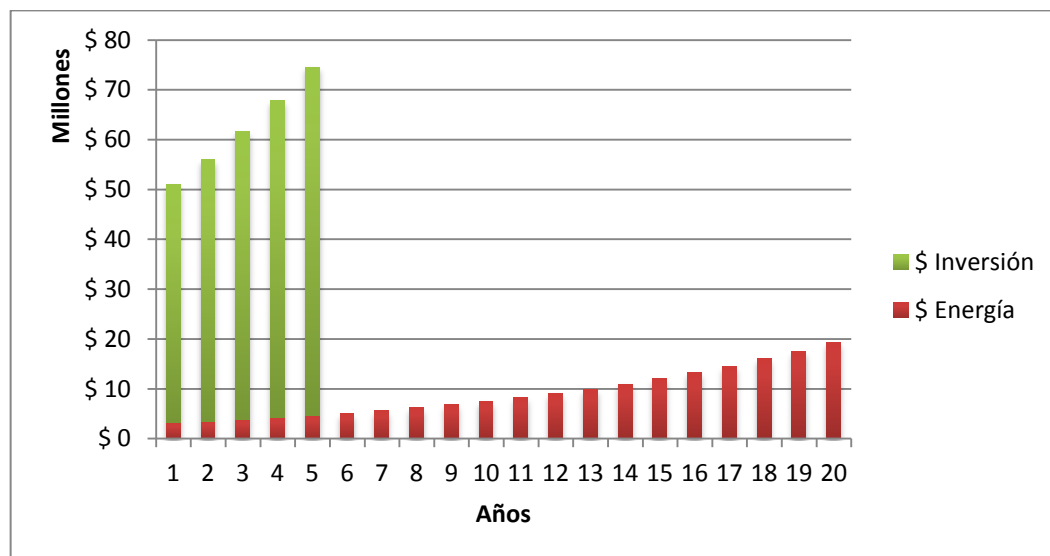
Tabla 8. Costo de Instalación y Operativos del Sistema de Protección Catódica Mediante rectificadores

ITEM	UNIDAD	CANT.	VALOR	
			UNITARIO	TOTAL
Ánodo con 130 metros de cable pre-empacado.	Und.	30	\$ 800,000	\$ 24.000.000
Celda de referencia permanente Cu/CuSO4 para medición de potencial eléctrico.	Und.	6	\$ 650,000	\$ 3.900.000
Rectificador Alimentación: 115/230 VAC, 1 fase 60Hz, encerramiento refrigerado por aire Nema 3R. Lámina 12 mills en acero galvanizado, pintura electrostática blanca 3-5 mills. Voltaje de salida: 24 VDC. Corriente de salida: 12 ADC 36 TAPS. Temperatura máxima de operación: 45 C	Und.	6	\$ 8,000,000	\$ 48.000.000
Caja de sobreponer, marca tecna ó similar, para ser instalada a la intemperie, con protección NEMA 4X, a prueba de agua, polvo y corrosión, fabricada en fundición de aluminio, producto certificado de acuerdo al RETIE	Und.	6	\$ 450,000	\$ 2.700.000
Coque calcinado de Petróleo (Bolsa x 22.7 kg)	Und.	50	\$ 150,000	\$ 7.500.000
Molde en grafico para protección catódica para unión de cable trenzado a superficie horizontal.	Und.	3	\$ 170,000	\$ 510.000
Chispero para soldadura exotérmica	Und.	3	\$ 35,000	\$ 105.000
Soldadura exotérmica de 15 gramos.	Und.	100	\$ 8,500	\$ 850.000
Protector mecánico para conexión exotérmica	Und.	150	\$ 2,500	\$ 375.000
Cinta de marcación para enterramiento directo, color Rojo de Ancho 4"	Und.	2	\$ 300,000	\$ 600.000
Terminal de compresión	Und.	5	\$ 8,500	\$ 42.500
Tubería conduit Rígida	m	100	\$ 150,000	\$ 15.000.000
Kit de aislamiento	Und.	6	\$ 2,000,000	\$ 12.000.000
SUBTOTAL MATERIALES				\$ 115.582.500
Perforación y encamisado (con cimentación)	m	200	\$ 250.000	\$ 50.000.000
Instalación de Ánodos e inyección de coque calcinado de petróleo	m	60	\$ 150.000	\$ 9.000.000
Instalación y conexión de las cajas de conexionado, puentes eléctricos y negativo.	HH	700	\$ 18.000	\$ 12.600.000

Instalación del rectificador.	HH	650	\$ 6.000	\$ 3.900.000
SUBTOTAL MONTAJE				\$ 75.500.000
COSTO DIRECTO				\$ 191,082,500
ADMINISTRACION 12%				\$ 22,929,900
IMPREVISTOS 5%				\$ 9,554,125
UTILIDAD 8%				\$ 15,286,600
TOTAL				\$ 238,853,125

Fuente: El Autor

Figura 19. Diagrama de barras representado el costo del proyecto y de operación



Fuente: El Autor

La anterior gráfica es el resultado de los siguientes parámetros:

INVERSION INICIAL		\$ 238.853.125
POTENCIA TOTAL PARA LOS 6 PUNTOS (camas anódicas) DE PC	w	724
COSTO DE LA ENERGIA x kw-h	\$/kw-h	\$ 500
NUMERO DE H OPERADAS EN EL AÑO	horas	8736
NUMERO DE kw-h OPERADOS EN EL AÑO	kw	6324,864

El tiempo de amortización de la inversión será de 5 años.

6.8 COSTOS DE INSTALACIÓN Y OPERATIVOS DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA MEDIANTE TERMOGENERACIÓN

Los cálculos del sistema de protección catódica son los mismos presentados en el ítem anterior, por lo tanto, esta sección del documento se centra en la selección y presupuesto de un sistema de termogeneración.

Tabla 9. Sistemas de generación múltiple disponibles, Global Thermoelectric.

Model	Power Specifications @20 °C	Fuel consumption				Dimensions L x W x H	WEIG HT
		Propane		Natural gas Std 1000 BTU/SCF (37.7MJ.SM ³) gas			
		US Gal/Day	Liters /Day	Ft ³ /Day	M ³ /Day	Mm(inches)	Kg (Lbs.)
5030	21 Watts @ 12 voltios 21 Watts @ 24 voltios	0.8	3.0	74	2.1	347x355x449 (14x14x18)	18 (40)
5060	60 Watts @ 6.7 voltios 54 Watts @ 12 voltios 54 Watts @ 24 voltios 54 Watts @ 54 voltios	1.5	5.7	155	4.4	629x372x987 (25x15x39)	41 (100)
5120	120 Watts @ 6.7 voltios 108 Watts @ 12 voltios 108 Watts @ 24 voltios 108 Watts @ 48 voltios	3.0	11.4	311	8.8	757x370x387 (30x15x39)	60 (132)
5220	220 Watts @ 12 voltios 176 Watts @ 24 voltios	7.4	28.0	700	19.7	797x417x1275 (31x16x50)	97 (214)
8550	480 Watts @ 12 voltios 550 Watts @ 24 voltios 480 Watts @ 48 voltios	20.1	76.0	1695	48.0	1549x1549x1016 (61x61x40)	102 (225)
1120	110 Watts @ 6.7 voltios 100 Watts @ 12	3.0	11.4	311	8.8	81x532x1150 (32x21x45)	127 (280)

	voltios 100 Watts @ 24 voltios 100 Watts @ 48 voltios						
1500	500 Watts @ 24 voltios	N/A	N/A	1695	48.0	1410x1410x2990 (55.5X55.5X117.5)	680 (150 0)

Fuente: Información tomada del catalogo del fabricante Global Thermoelectric

6.8.1 Selección de los Termogeneradores

De acuerdo con la tabla anterior, la selección de los TEG es como sigue:

Tramo 1 y 1a : Serie 5220 176 watts @ 24 Voltios (dos TEG).

Tramo 2 y 2a : Serie 5220 176 watts @ 24 A (dos TEG) ó Serie 5120 108 watts @ 12 A (dos TEG).

Tramo 3 y 3a : Serie 5220 176 watts @ 24 A (dos TEG).

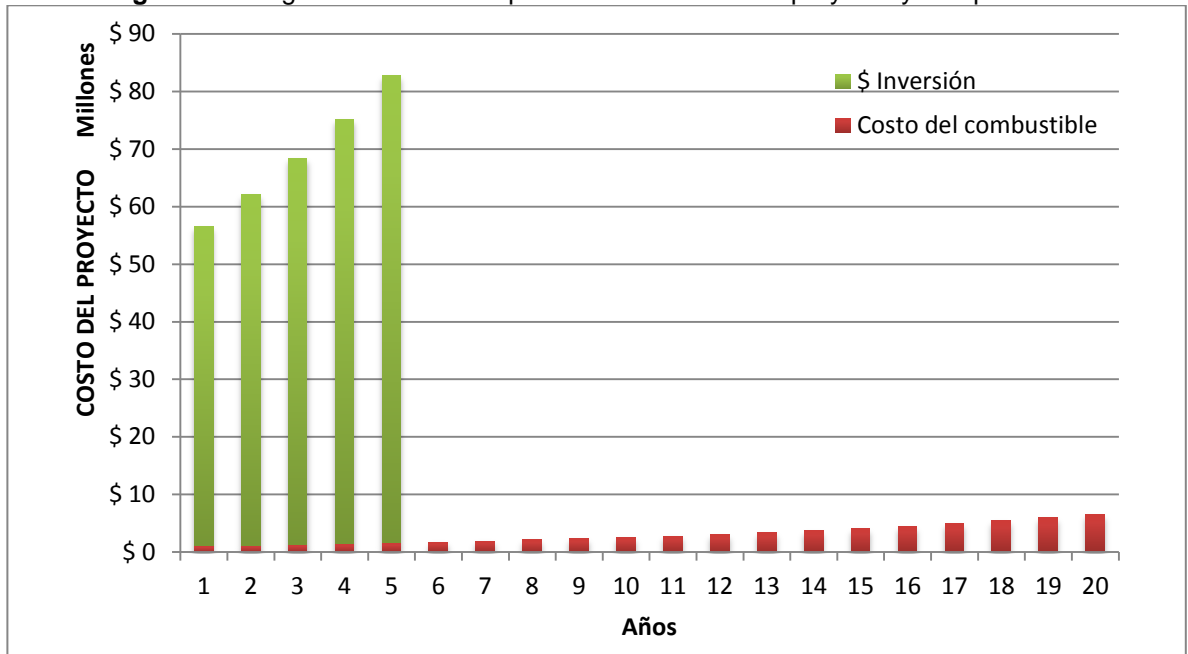
6.8.2 Costos de instalación y operativos del sistema de protección catódica por corriente impresa

Tabla 10. Costo de Instalación y Operativos del Sistema de Protección Catódica Mediante Termogeneración.

ITEM	UNIDAD	CANT.	VALOR	
			UNITARIO	TOTAL
Anodo con 130 metros de cable pre empacado.	Und.	30	\$800.000	\$ 3,900,000
Celda de referencia permanente Cu/CuSO4 para medición de potencial eléctrico.	Und.	6	\$ 650.000	\$ 84,000,000
Equipo de termogeneración 5220	Und.	6	\$24.000.000	\$144,000,000
Coque calcinado de Petróleo (Bolsa x 22.7 kg)	Und.	50	\$ 90.000	\$ 510,000
Molde en grafico para protección catódica para unión de cable trenzado a superficie horizontal.	Und.	3	\$ 170.000	\$ 105,000
Chispero para soldadura exotérmica	Und.	3	\$ 35.000	\$ 850,000
Soldadura exotérmica de 15 gramos.	Und.	100	\$ 8.500	\$ 375,000
Protector mecánico para conexión exotérmica	Und.	150	\$ 2.500	\$ 600,000
Cinta de marcación para enterramiento directo, color Rojo de Ancho 4"	Und.	2	\$ 300.000	\$ 15,000,000
Tubería conduit Rígida	m	100	\$ 150.000	\$ 12,000,000
Kit de aislamiento	Und.	6	\$ 2.000.000	\$ 3,900,000
SUBTOTAL MATERIALES				\$ 205.840.000
Perforación y encamisado (con cimentación)	m	20	\$ 250.000	\$ 5.000.000
Instalación de Anodos e inyección de coque calcinado de petróleo	m	60	\$ 9.000.000	\$ 9.000.000
Instalación y conexión de las cajas de conexionado, puentes eléctricos y negativo.	HH	100	\$ 1.800.000	\$ 1.800.000
Perforación y encamisado (con cimentación)				
SUBTOTAL MONTAJE				\$ 15.800.000
COSTO DIRECTO				\$ 221,640,000
ADMINISTRACION 12%				\$ 26,596,800
IMPREVISTOS 5%				\$ 11,082,000
UTILIDAD 8%				\$ 17,731,200
TOTAL				\$ 277.050.000

Fuente: El Autor

Figura 20. Diagrama de barras representado el costo del proyecto y de operación



Fuente: El Autor

La anterior grafica es el resultado de los siguientes parámetros:

INVERSION INICIAL		\$ 277.050.000
CONSUMO DE GAS	SCF	700
COSTO DE LA ENERGIA 1000 SCF	\$	4230
NUMERO DE DIAS OPERADAS EN EL AÑO	día	360
NUMERO DE SCFD CONSUMIDOS EN EL AÑO	SCFA	252.000

El tiempo de amortización de la inversión será de 5 años.

CONCLUSIONES

Tomando en consideración las evaluaciones económicas anteriores y considerando que:

- a. Las licencias ambientales para el tendido de las líneas eléctricas desde las líneas de transferencia de energía hacia las tuberías, demanda de un tiempo razonable para solicitud de construcción (un proceso de este tipo puede demorar entre 3 y 4 meses).
- b. La instalación de las líneas eléctricas demanda maquinaria pesada y mayores cantidades de horas hombre para realizar esta actividad.
- c. La protección catódica convencional exige el pago de la energía a terceros, retrasando los procesos administrativos.

Por lo anterior se determina que la instalación de equipos de termogeneración minimizan los problemas antes mencionados reflejándose en menores costos del proyecto.

- a. Si bien el presupuesto de instalación del SPC usando URPC tradicionales es levemente inferior a la termogeneración, esta reduce el costo asociado a la operación, dado que los costos de la energía son asumidos por el mismo operador de la línea. Normalmente el flujo de gas natural para consumo de los TEG se puede considerar dentro del 1% del desbalance del transportador.
- b. Aunque la instalación de un sistema de protección catódica con termogeneración para proyectos con mayores longitudes de tubería

normalmente requiere una inversión mayor que un sistema convencional, este se justifica a mediano plazo por la confiabilidad del sistema y los bajos costos de mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Efecto Peltier, Marco Vinicon Tobar padilla, 23 de diciembre de 2006
2. Goldsmid, H.J., "Design and construction of modules", in Electronic Refrigeration. 1986, Pion: London, UK,pp. 168-197.
3. Ioffe, A.F. "Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling", InfoSearch Ltd., London, 1957
4. Kemal Nisancioglu. «Cathodic Protection». Rev. Material Perfomance, diciembre, 1984.
5. La protección catódica y sus aplicaciones. Corrosión y Protección, vol. 1, N.º 1, 1988.
6. Sochard, I.I. "Design of Construction of a Peltier Temperature-control Device". Advanced Energy Conversion, Vol.2, (1962),pp.255-263.
7. Uemura, K.I. " Construction and Application of Peltier Modules. Part 1. Construction of Peltier Module". Proc.9th Cimtec-World Forum on New Materials. Symposium VII-Innovative Materials in Advanced Energy Technologies. 1999, pp. 701-712.

ANEXO A

DOPAJE DE SEMICONDUCTORES¹

En la producción de semiconductores, se denomina dopaje al proceso intencional de agregar impurezas en un semiconductor extremadamente puro (también referido como intrínseco) con el fin de cambiar sus propiedades eléctricas. Las impurezas utilizadas dependen del tipo de semiconductores a dopar. A los semiconductores con dopajes ligeros y moderados se los conoce como extrínsecos. Un semiconductor altamente dopado, que actúa más como un conductor que como un semiconductor, es llamado degenerado.

El número de átomos dopantes necesarios para crear una diferencia en las capacidades conductoras de un semiconductor es muy pequeña. Cuando se agregan un pequeño número de átomos dopantes (en el orden de 1 cada 100.000.000 de átomos) entonces se dice que el dopaje es bajo o ligero. Cuando se agregan muchos más átomos (en el orden de 1 cada 10.000 átomos) entonces se dice que el dopaje es alto o pesado. Este dopaje pesado se representa con la nomenclatura N+ para material de tipo N, o P+ para material de tipo P.

1.1 ELEMENTOS DOPANTES

Para los semiconductores del Grupo IV como Silicio, Germanio y Carburo de silicio, los dopantes más comunes son elementos del Grupo III o del Grupo V. Boro, Arsénico, Fósforo, y ocasionalmente Galio, son utilizados para dopar al Silicio.

1.2 TIPOS DE MATERIALES DOPANTES

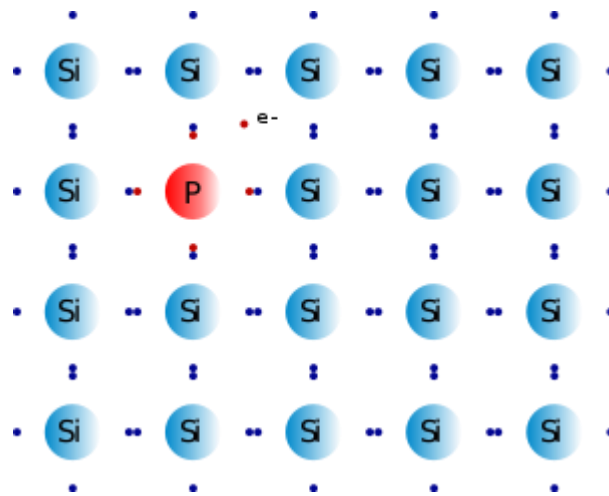
1.2.1 Tipo N

Se llama material tipo N al que posee átomos de impurezas que permiten la aparición de electrones sin huecos asociados a los mismos. Los átomos de este tipo se llaman donantes ya que "donan" o entregan electrones. Suelen ser de valencia cinco, como el Arsénico y el Fósforo. De esta forma, no se ha desbalanceado la neutralidad eléctrica, ya que el átomo introducido al semiconductor es neutro, pero posee un electrón no ligado, a diferencia de los átomos que conforman la estructura original, por lo que la energía necesaria para separarlo del átomo será menor que la necesitada para romper una ligadura en el cristal de silicio (o del semiconductor original). Finalmente, existirán más

¹ Información tomada de la página de WIKIPEDIA [http://es.wikipedia.org/wiki/Dopaje_\(semiconductores\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Dopaje_(semiconductores))

electrones que huecos, por lo que los primeros serán los portadores mayoritarios y los últimos los minoritarios. La cantidad de portadores mayoritarios será función directa de la cantidad de átomos de impurezas introducidos.

El siguiente es un ejemplo de dopaje de Silicio por el Fósforo (dopaje N). En el caso del Fósforo, se dona un electrón.

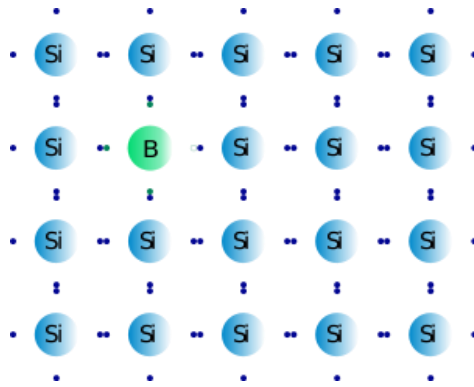


Dopaje de tipo N

1.2.2 Tipo P

Se llama así al material que tiene átomos de impurezas que permiten la formación de huecos sin que aparezcan electrones asociados a los mismos, como ocurre al romperse una ligadura. Los átomos de este tipo se llaman aceptores, ya que "aceptan" o toman un electrón. Suelen ser de valencia tres, como el Aluminio, el Indio o el Galio. Nuevamente, el átomo introducido es neutro, por lo que no modificará la neutralidad eléctrica del cristal, pero debido a que solo tiene tres electrones en su última capa de valencia, aparecerá una ligadura rota, que tenderá a tomar electrones de los átomos próximos, generando finalmente más huecos que electrones, por lo que los primeros serán los portadores mayoritarios y los segundos los minoritarios. Al igual que en el material tipo N, la cantidad de portadores mayoritarios será función directa de la cantidad de átomos de impurezas introducidos.

El siguiente es un ejemplo de dopaje de Silicio por el Boro (P dopaje). En el caso del boro le falta un electrón y, por tanto, es donado un hueco de electrón.



Dopaje de tipo N