

Implementación de un Sistema de Protección Catódica por Corriente Impresa Automatizado,
Alimentado con Energía Solar para un Gasoducto Propiedad de Gases del Caribe S.A.

Luis Fernando Cervantes Silva

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Ingeniería de Petróleos y Gas

Director

Javier Enrique Gómez Ramírez

Magister en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Dedico este logro personal a Dios, que me brindo confianza, constancia, perseverancia y sabiduría en este proceso.

A mi esposa Daniela Angarita Amaya, quiero agradecerte especialmente a ti mi mona de ojos bonitos por no dejarme desfallecer hasta lograr mi meta y que sin tu apoyo no hubiera sido posible. Te amo.

A mis hijos, Victoria Cervantes y Alejandro Cervantes que con su amor y motivación me animaron hasta cumplir esta meta.

A mis padres y hermanos, Luis Ovidio Cervantes, Edilsa Silva, Christian Cervantes y Miguel Cervantes, espero honrarlos y hacerlos sentir orgullosos con este logro, que comparto con ustedes.

A mis suegros, Eduardo Angarita y Nubia Amaya que con sus consejos me ayudaron a lograr mi meta.

A Gases del Caribe, Miguel Cepeda, Roberto Cure y Clementina Holguín por apoyarme incondicionalmente en mi desarrollo y crecimiento profesional.

Finalmente, a toda la familia Silva Ortiz, a mi gran amigo y colega Armando Luis Lacera Rincón y a mi director de Tesis Javier Enrique Gómez Ramírez por su gran apoyo, dirección, orientación y asesoría profesional para llevar a cabo mi objetivo.

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

Las directivas de Gases del caribe S.A. Empresa de Servicios Públicos, por su apoyo incondicional, la confianza depositada en mí y por suministrar los recursos necesarios, para la realización de este posgrado. A la Universidad Industrial de Santander, por su colaboración para el desarrollo de este proyecto.

Tabla de Contenido

	pág.
Introducción	22
1.Objetivos	24
1.1 Objetivo General	24
1.2 Objetivos Específicos.....	24
2. Planteamiento del Problema	24
3. Marco Referencial.....	25
3.1 Antecedentes Investigativos.....	25
3.2. Marco Teórico - Conceptual	31
3.2.1 Teoría de la corrosión	31
3.2.2 Consideraciones termodinámicas.....	31
3.2.3 La celda de corrosión	33
3.2.4 Sistemas de protección catódica	35
4. Generalidades del Sistema de Protección Catódica por Corriente Impresa Inicialmente Instalado en la Red de Gasoductos de Distribución Interdepartamental de Diámetro 8 Pulgadas Propiedad Gases del Caribe S.A. E.S.P.	41
4.1 Antecedentes	41
4.2 Información de los Campos Menores El Díficil y Maracas.....	42
4.3 Localización del Gasoducto	46

4.4 Operación.....	47
4.4.1 Sistema de protección catódica # 1.....	47
4.4.2 Sistema de protección catódica # 2.....	47
4.4.3 Sistema de protección catódica # 3.....	48
5. Dimensionamiento del Sistema de Energía Fotovoltaico que Va a Alimentar el Nuevo Sistema de Protección Catódica de la Red de Gasoductos.....	49
5.1 Criterio de Protección Catódica.....	49
5.2 Resultados de las Pruebas de Inyección de Corriente en la Red de Gasoductos para Evaluar su Requerimiento	50
5.3 Cálculo de Resistividades de las Camas Anódicas Instaladas	53
5.3.1 Método de Wenner.....	53
5.3.2 Análisis de capas de Barnes	58
5.4 Evaluación de las Camas Anódicas Instaladas	63
5.4.1 Cama anódica estación Mariangola	63
5.4.1.1 Cálculo para determinar el número mínimo de ánodos tipo “MMO” requeridos (N).	65
5.4.1.2 Resistencia de la cama anódica lecho continuo horizontal (R_H):.....	66
5.4.1.3 Resistencia eléctrica del cable negativo (R_{CN}).	67
5.4.1.4 Resistencia eléctrica del cable positivo (R_{CP}).	68
5.4.1.5 Resistencia de los cables de los ánodos.	68
5.4.1.6 Resistencia cable conductor principal.:.....	70
5.4.1.7 Resistencia total circuito positivo (R_{CP}).	70
5.4.1.8 Resistencia eléctrica del cátodo (R_C).	71

5.4.1.9 Resistencia eléctrica total del circuito (R_{Total}).....	71
5.4.1.10 Dimensionamiento del rectificador.....	72
5.4.1.11 Cantidad de coque requerido.	73
5.4.1.12 Cálculo de la remotividad de la cama anódica lecho continuo horizontal.....	75
5.4.2 Cama anódica válvula Algarrobo.....	77
5.4.2.1 Cálculo para determinar el número mínimo de ánodos tipo “MMO” requeridos (N).	79
5.4.2.2 Resistencia de la cama anódica lecho continuo horizontal (R_H).....	80
5.4.2.3 Resistencia eléctrica del cable negativo (R_{CN}).....	81
5.4.2.4 Resistencia eléctrica del cable positivo (R_{CP}).:.....	82
5.4.2.5 Resistencia de los cables de los ánodos..	82
5.4.2.6 Resistencia cable conductor principal.....	84
5.4.2.7 Resistencia total circuito positivo (R_{CP}).	84
5.4.2.8 Resistencia eléctrica del cátodo (R_C).:.....	85
5.4.2.9 Resistencia eléctrica total del circuito (R_{Total}).....	85
5.4.2.10 Dimensionamiento del rectificador.....	86
5.4.2.11 Cantidad de coque requerido.	87
5.4.2.12 Cálculo de la remotividad de la cama anódica lecho continuo horizontal.....	89
5.4.3 Cama Anódica válvula loma colorada	91
5.4.3.1 Cálculo para determinar el número mínimo de ánodos tipo “MMO” requeridos (N).:	92
5.4.3.2 Resistencia de la cama anódica lecho continuo horizontal (R_H).....	93
5.4.3.3 Resistencia eléctrica del cable negativo (R_{CN}).....	95
5.4.3.4 Resistencia eléctrica del cable positivo (R_{CP}).:.....	96
5.4.3.5 Resistencia de los cables de los ánodos.	96

5.4.3.6 Resistencia cable conductor principal.....	98
5.4.3.7 Resistencia total circuito positivo (R_{CP}):.....	98
5.4.3.8 Resistencia eléctrica del cátodo (R_C).	99
5.4.3.9 Resistencia eléctrica total del circuito (R_{Total}).....	99
5.4.3.10 Dimensionamiento del rectificador.....	100
5.4.3.11 Cantidad de coque requerido.	101
5.4.3.12 Cálculo de la remotividad de la cama anódica lecho continuo horizontal.....	103
5.5 Descripción de los Nuevos Equipos para Suplir los Rectificadores de Corriente Alterna Instalados Inicialmente	105
5.6 Cálculos de los Sistemas de Alimentación Fotovoltaicos.....	108
5.6.1 Cálculo de las horas solar pico disponibles en los puntos de inyección de corriente	109
5.6.2 Cálculo del sistema de alimentación fotovoltaico del sistema de protección catódica del gasoducto Bosconia Valledupar.....	112
5.6.2.1 Consumo de carga total corregido..	112
5.6.2.2 Capacidad del panel solar.	113
5.6.2.3 Número de paneles solares a instalar.	114
5.6.2.4 Capacidad del banco de baterías.	115
5.6.2.5 Número de baterías.	116
5.6.2.6 Capacidad del regulador de carga.	116
5.6.2.7 Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Mariangola.	117
5.6.3 Cálculo del sistema de alimentación fotovoltaico del sistema de protección catódica del gasoducto Bosconia Tucurín	118

5.6.3.1 Consumo de carga total corregido.	119
5.6.3.2 Capacidad del panel solar.	119
5.6.3.3 Número de paneles solares a instalar.	120
5.6.3.4 Capacidad del banco de baterías.	121
5.6.3.5 Número de baterías.	122
5.6.3.6 Capacidad del Regulador de Carga.	122
5.6.3.7 Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Algarrobo.	123
5.6.4 Cálculo del sistema de alimentación fotovoltaico del sistema de protección catódica del gasoducto Pueblo Nuevo Bosconia Cuatro Vientos	124
5.6.4.1 Consumo de carga total corregido.	124
5.6.4.2 Capacidad del panel solar.	125
5.6.4.3 Número de paneles solares a instalar.	126
5.6.4.4 Capacidad del banco de baterías.	127
5.6.4.5 Número de baterías.	127
5.6.4.6 Capacidad del Regulador de Carga.	128
5.6.4.7 Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Loma Colorada.....	129
6. Integración de las Variables de Protección Catódica Mediante un Controlador Automatizado PID al Sistema SCADA	131
6.1 Unidad Terminal Remota.....	131
6.2 Generalidades de Control Lineal	131

6.2.1 Sistemas de control retroalimentados	133
6.3 Controlador Proporcional – Integral – Derivativo (PID).....	135
6.3.1 Acciones de un controlador PID	135
6.3.2 Acción proporcional.....	136
6.3.3 Acción integral.....	137
6.3.4 Acción derivativa	138
6.3.5 Acción proporcional - integral – derivativa (PID).....	139
 7. Evaluación del Desempeño del Nuevo Sistema de Protección Catódica de la Red de Gasoductos de Interconexión Magdalena - Cesar de Acuerdo con la Norma SP-0169 Establecida por NACE INTERNATIONAL	142
7.1 Descripción del Método.....	142
7.1.1 Descripción del estándar practico NACE SP0169-2013	142
7.1.2 Consideración de la caída óhmica.....	144
7.1.3 Técnica de inspección de intervalo de potencial cerrado (CIPS)	151
7.2 Detalles de la Inspección CIPS Realizada	152
7.3. Resultados y Análisis.....	153
7.3.1 Resultados del CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar.....	153
7.3.2 Resultados del CIPS gasoducto Bosconia – Tucurínca	164
7.3.3 Resultados del CIPS gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia – Cuatro Vientos	174
 8. Comparativo de Costos del Sistemas de Protección Catódica con Rectificador AC/DC Alimentado con Energía Eléctrica Convencional Inicialmente Instalado Versus el Nuevo Sistema	

de Protección Catódica con Tarjeta Inyectora de Corriente Alimentada con Energía Solar Fotovoltaica.....	182
8.1. Comparativo de Costos en la Construcción e Instalación.....	182
8.2. Comparativo de Costos en la Operación y Mantenimiento	187
9. Conclusiones	192
10. Recomendaciones	194
Referencias Bibliográficas	195
Apéndices.....	19

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1 Energía libre standard ($-\Delta G_o$) de formación de algunos óxidos en Kcal/mol de óxido a 27°C	32
Tabla 2 Información general campo El Difícil	42
Tabla 3 Cromatografía del gas producido en campo El Difícil	43
Tabla 4 Propiedades del gas El Difícil	43
Tabla 5 Información general campo Maracas	44
Tabla 6 Cromatografía del gas producido en campo Maracas	44
Tabla 7 Propiedades del gas Maracas	45
Tabla 8 Resultados prueba de corriente gasoducto Bosconia - Valledupar.....	50
Tabla 9 Resultados prueba de corriente gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia – Cuatro Vientos	51
Tabla 10 Resultados prueba de corriente gasoducto Bosconia - Tucurín	51
Tabla 11 Resumen del requerimiento de corriente por gasoducto.....	52
Tabla 12 Dimensionamiento del requerimiento de corriente por gasoducto	53
Tabla 13 Resistividad promedio del terreno donde está instalada la cama anódica Mariangola por el método de Wenner	55
Tabla 14 Resistividad promedio del terreno donde está instalada la cama anódica Algarrobo por el método de Wenner	56
Tabla 15 Resistividad promedio del terreno donde está instalada la cama anódica Loma Colorada por el método de Wenner	57
Tabla 16 Análisis de Barnes para cálculo de resistividad cama anódica Mariangola.....	61

Tabla 17	Análisis de Barnes para cálculo de resistividad cama anódica Algarrobo.....	61
Tabla 18	Análisis de Barnes para cálculo de resistividad cama anódica Loma Colorada	62
Tabla 19	Parámetros de la cama anódica instalada en Mariangola.....	64
Tabla 20	Parámetros de la cama anódica instalada en Algarrobo.....	78
Tabla 21	Resumen de los parámetros de la cama anódica horizontal.....	92
Tabla 22	Requerimiento de energía para los sistemas de protección catódica	109
Tabla 23	Especificaciones del panel solar	114
Tabla 24	Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Mariangola.....	117
Tabla 25	Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Algarrobo.....	123
Tabla 26	Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Loma Colorada	129
Tabla 27	Costos de la construcción e instalación del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Valledupar	183
Tabla 28	Costos de la construcción e instalación del rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Valledupar	183
Tabla 29	Costos de la construcción e instalación del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Tucurín	184
Tabla 30	Costos de la construcción e instalación del rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Tucurín	185
Tabla 31	Costos de la construcción e instalación del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Pueblo Nuevo Bosconia Cuatro Vientos	185

Tabla 32	Costos de la construcción e instalación del rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Pueblo Nuevo Bosconia Cuatro Vientos	186
Tabla 33	Resumen comparativo de costos construcción e instalación del equipo XARTU/1-CP versus la unidad rectificadora AC/DC	187
Tabla 34	Costos de operación y mantenimiento del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Valledupar	188
Tabla 35	Costos de operación y mantenimiento del rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Valledupar	188
Tabla 36	Costos de operación y mantenimiento del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Tucurín	189
Tabla 37	Costos de operación y mantenimiento del equipo rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Tucurín	189
Tabla 38	Costos de operación y mantenimiento del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Pueblo Nuevo Bosconia Cuatro Vientos	190
Tabla 39	Costos de operación y mantenimiento del equipo rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Pueblo Nuevo Bosconia Cuatro Vientos	190
Tabla 40	Resumen comparativo costos de operación y mantenimiento de los sistemas de protección catódica	191

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1	Ciclo de óxido de hierro a acero a óxido de hierro..... 33
Figura 2	Celda de corrosión del hierro..... 35
Figura 3	Circuito eléctrico de una celda de corrosión simple..... 37
Figura 4	Aplicación de corriente de protección catódica..... 38
Figura 5	Detección de la corrosión 39
Figura 6	Ubicación geográfica de los campos menores El Difícil y Maracas 45
Figura 7	Ubicación geográfica del gasoducto de 8” 46
Figura 8	Esquema general de la configuración del sistema de protección catódica instalado 48
Figura 9	Ilustración del método de Wenner 54
Figura 10	Representación gráfica del análisis de capas de Barnes 59
Figura 11	Ilustración cama anódica Mariangola 64
Figura 12	Ilustración cama anódica Algarrobo 78
Figura 13	Ilustración cama anódica Loma Colorada..... 91
Figura 14	Imagen Equipo XARTU/1 CP (Cathodic Protection)..... 106
Figura 15	Imagen Equipo WILOG-CP (Cathodic Protection)..... 107
Figura 16	Esquema de instalación equipos WILOG-CP..... 108
Figura 17	Mapa de radiación solar en Colombia 110
Figura 18	Ubicación de rectificadores en el mapa de radiación solar de Colombia 111
Figura 19	Esquema del sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Valledupar 118
Figura 20	Esquema del sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Tucurín..... 124

Figura 21	Esquema del sistema de protección catódica gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia Cuatro Vientos	130
Figura 22	Sistema de control en lazo abierto	132
Figura 23	Sistema de control en lazo cerrado	132
Figura 24	Esquema típico de un sistema de control retroalimentado.....	134
Figura 25	Diagrama de bloques esquemático de un sistema de control retroalimentado..	134
Figura 26	Esquema de un sistema de control retroalimentando con ganancia proporcional	136
Figura 27	Esquema de un sistema de control retroalimentando con ganancia integral	137
Figura 28	Esquema de un sistema de control retroalimentando con ganancia derivativa.....	139
Figura 29	Fotos del montaje.....	141
Figura 30	Caídas óhmicas en un circuito de medición de potencial	145
Figura 31	Circuito eléctrico de caídas óhmicas simplificado.....	146
Figura 32	Ilustración gráfica del ciclado de corriente en el método de interrupción de corriente	149
Figura 33	Representación del pico positivo en el ciclado de corriente cuando se interrumpe la corriente de protección catódica	150
Figura 34	Configuración del CIPS	152
Figura 35	Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 0+000 al Km 5+000)	154
Figura 36	Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 5+000 al Km 10+000)	154
Figura 37	Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 10+000 al Km 15+000) ...	155
Figura 38	Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 15+000 al Km 20+000)	155
Figura 39	Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 20+000 al Km 25+000) ...	156
Figura 40	Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 25+000 al Km 30+000) ...	156

Figura 41	Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 30+000 al Km 35+000) ...	157
Figura 42	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 35+000 al Km 40+000).....	157
Figura 43	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 45+000 al Km 50+000).....	158
Figura 44	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 50+000 al km 55+000).....	158
Figura 45	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 55+000 al km 60+000).....	159
Figura 46	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 60+000 al km 65+000).....	159
Figura 47	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 60+000 al km 65+000).....	160
Figura 48	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 65+000 al km 70+000).....	160
Figura 49	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 70+000 al km 75+000) ..	161
Figura 50	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 75+000 al km 80+000).....	161
Figura 51	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 80+000 al km 85+000).....	162
Figura 52	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 85+000 al km 90+000) ..	162
Figura 53	Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 90+000 al km 96+000).....	163
Figura 54	Grafica CIPS tramo Valledupar – La Paz (Km 0+000 al km 5+000).....	163
Figura 55	Grafica CIPS tramo Valledupar – La Paz (Km 5+000 al km 11+200).....	164
Figura 56	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 0+000 al Km 5+000)	165
Figura 57	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 5+000 al Km 10+000)	165
Figura 58	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 10+000 al Km 15+000)	166
Figura 59	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 15+000 al Km 20+000)	166
Figura 60	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 20+000 al Km 25+000)	167
Figura 61	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 25+000 al Km 30+000)	167
Figura 62	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 30+000 al Km 35+000)	168
Figura 63	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 35+000 al Km 40+000)	168

Figura 64	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 40+000 al Km 45+000)	169
Figura 65	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 45+000 al Km 50+000)	169
Figura 66	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 50+000 al Km 55+000)	170
Figura 67	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 55+000 al Km 60+000)	170
Figura 68	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 60+000 al Km 65+000)	171
Figura 69	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 65+000 al Km 70+000)	171
Figura 70	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 70+000 al Km 75+000)	172
Figura 71	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 75+000 al Km 80+000)	172
Figura 72	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 80+000 al Km 85+000)	173
Figura 73	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 85+000 al Km 90+000)	173
Figura 74	Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 90+000 al Km 95+000)	174
Figura 75	Grafica CIPS Gasoducto Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 0+000 al Km 5+000)	175
Figura 76	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 5+000 al Km 10+000)	175
Figura 77	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 10+000 al Km 15+000)	176
Figura 78	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 15+000 al Km 20+000)	176
Figura 79	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 20+000 al Km 25+000)	177
Figura 80	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 25+000 al Km 30+000)	177

Figura 81	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 30+000 al Km 35+000)	178
Figura 82	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 35+000 al Km 40+000)	178
Figura 83	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 40+000 al Km 45+000)	179
Figura 84	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 45+000 al Km 50+000)	179
Figura 85	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 50+000 al Km 55+000)	180
Figura 86	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 55+000 al Km 60+000)	180
Figura 87	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 60+000 al Km 65+000)	181
Figura 88	Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 65+000 al Km 67+000)	181

Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A: Base de datos del CIPS Gasoducto Bosconia – Valledupar

Apéndice B: Base de datos del CIPS Gasoducto Bosconia – Tucurínca

Apéndice C: Base de datos del CIPS Gasoducto Pueblo nuevo - Bosconia – Cuatro Vientos

Apéndice D: Base de datos del perfil de resistividades de suelos

Apéndice E: Configuración de la programación de la RTU

Resumen

Título: Implementación de un Sistema de Protección Catódica por Corriente Impresa Automatizado, Alimentado con Energía Solar para un Gasoducto Propiedad de Gases del Caribe S.A. *

Autor: Luis Fernando Cervantes Silva**

Palabras Clave: Corrosión, gas natural, energía solar fotovoltaica, automatización, gasoductos de acero, protección catódica.

Descripción: El fenómeno de la corrosión es un problema de gran envergadura y relevancia, que se encuentra de manera intrínseca en la industria gasífera y repercute de manera directa en cada uno de los actores de la cadena de valor del gas natural, como son los productores, transportadores, distribuidores comercializadores y consumidores. Una mala gestión de la corrosión puede resultar en la materialización de un evento catastrófico.

Se implementó un sistema de protección catódica a una red de gasoductos de acero alimentado con energía solar fotovoltaica que brinda protección catódica por medio de una tarjeta inyectora de corriente automatizada mediante un controlador Proporcional, Integrativo y Derivativo (PID), y además se integró a un sistema SCADA, que servirá para estudiar con datos en tiempos real de las variables fundamentales de este proceso. Con los resultados de las inspecciones CIPS realizadas se logró verificar el cumplimiento del criterio de -850mV Vs un electrodo de referencia Cu/CuSO_4 establecido en la normativa NACE SP0169-2013.

* Tesis de Maestría.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Javier Enrique Gomez Ramirez. Magister en Ingeniería de Materiales.

Abstract

Title: Implementation of an Automated Printed Current Cathodic Protection System, Supplied with Solar Energy for a Gas Pipeline Property of Gases del Caribe S.A *

Author: Luis Fernando Cervantes Silva**

Key Words: Corrosion, natural gas, photovoltaic solar energy, automation, steel gas pipelines, cathodic protection.

Description: The phenomenon of corrosion is a problem of great importance and importance, which is intrinsically found in the gas industry and has a direct impact on each of the actors in the natural gas value chain, such as producers, transporters, distributors, marketers and consumers. Poor corrosion management can result in a catastrophic event.

A cathodic protection system powered by photovoltaic solar energy was implemented that provides cathodic protection by means of an automated current injector card using a Proportional, Integrative and Derivative (PID) controller, and it was also integrated into a SCADA system, which will serve to study with data in real time of the fundamental variables of this process. With the results of the CIPS inspections carried out, it was possible to verify compliance with the criterion of -850mV Vs a Cu / CuSO₄ reference electrode established in the NACE SP0169-2013 standard.

* Master Degree.

** Faculty of Physicochemical Engineering. Petroleum Engineering School. Director: Javier Enrique Gomez Ramirez. Master in Materials Engineering.

Introducción

La corrosión es un proceso natural irreversible inherente a todos los metales y se presenta por la interacción directa de estos con su entorno, Los efectos de la corrosión en la vida diaria de las personas son directos, porque afecta la vida útil de algunas posesiones domésticas, e indirectos, ya que los productores, operadores y proveedores de bienes y servicios también incurren en altos costos para combatir este fenómeno antes que sus productos lleguen a los consumidores.

En el año 2015 la empresa Gases del Caribe S.A. Empresa de Servicios Públicos, puso en funcionamiento una red de gasoductos de distribución de acero API 5L X52 de 8 pulgadas de diámetro, con una longitud de 270 Km para la interconexión de los departamentos Magdalena – Cesar. Como medida de control de la corrosión externa, se construyó un sistema de protección catódica por corriente impresa con rectificadores AC/DC, pero transcurrido 2 años de la puesta en servicio de la red de gasoductos se evidenció fallas en el sistema de protección catódica por razones de inestabilidad en la red de alimentación de corriente alterna, vandalismo y mal diseño en los respaldos del sistema de protección catódica.

Con base en lo anterior, se plantea establecer una herramienta que permita brindar protección catódica por medio de una tarjeta inyectora de corriente automatizada mediante un controlador Proporcional, Integrativo y Derivativo (PID) y enlazarlo con un sistema de SCADA que permita cambiar y/o monitorear los puntos de ajustes del potencial de protección de tubería deseado, alimentado con un sistema solar fotovoltaico que garantice autonomía energética del suministro convencional de corriente alterna como se acostumbra normalmente.

El estudio deberá cumplir con todas las características técnicas y puesta en funcionamiento de un sistema de protección catódica por corriente impresa para una red de gasoducto de distribución de interconexión en los departamentos Magdalena – Cesar de acero API 5L X52 de 8 pulgadas de diámetro, con una longitud aproximada de 270 Km perteneciente a la empresa Gases del Caribe S.A. Empresa de Servicios Públicos.

Con los resultados del trabajo, se espera su implementación en gasoductos con problemáticas similares para resolver situaciones de autonomía energética frente al suministro de energía convencional AC, eficiencia energética y obtención de datos remotamente en tiempo real de las variables de protección catódica.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Implementar un sistema de protección catódica por corriente impresa automatizado, alimentado con energía solar para un gasoducto propiedad de Gases del Caribe S.A.

1.2 Objetivos Específicos

Describir el actual sistema de protección catódica instalado en un gasoducto propiedad de Gases del Caribe S.A.

Calcular el tamaño del sistema de energía solar fotovoltaica para utilizarlo como fuente de alimentación para el sistema de protección catódica.

Poner en funcionamiento el nuevo sistema de protección catódica por corriente impresa alimentado con energía solar.

Integrar a un sistema SCADA las variables del sistema de protección catódica mediante un control automatizado PID, para monitorear y estudiar el comportamiento en tiempo real de las variables del proceso y ajustarlas para optimizar el funcionamiento del sistema.

Evaluar el comportamiento de los puntos de ajustes del potencial de protección de tubería de acuerdo con el estándar NACE SP0169-2013.

2. Planteamiento del Problema

Actualmente Gases del Caribe S.A. Empresa de Servicios Públicos busca ser líder en la distribución y comercialización de gas natural en los departamentos Atlántico, Cesar y

Magdalena, sin embargo, se enfrenta a diferentes problemáticas que dificultan alcanzar su misión, entre las cuales se encuentra la interrupción del servicio por posibles fallas en la operación del gasoducto de distribución por el fenómeno de la corrosión que produce afectación en la tubería de acero. La situación anteriormente planteada se debe posiblemente a la ineficiencia y mal diseño del sistema de protección catódica existente. La persistencia del panorama descrito anteriormente con llevará a la afectación de la normal operación del gasoducto por presentarse fugas en la línea, causando sobre costos por incurrir en mantenimientos correctivos debido a la corrosión en la tubería, también representa riesgos sociales por peligro de ignición por fuga de gas, efectos ambientales adversos al ecosistema y eventuales sanciones ambientales por emisión de gas a la atmósfera y finalmente todo lo expuesto precedentemente significa costos adicionales y un detrimento patrimonial de un activo de la empresa.

Mediante la realización de este proyecto se va a diseñar, construir y poner en funcionamiento un sistema de protección catódica alimentado con energía solar fotovoltaica, que además se integrará a un sistema SCADA, que servirá para estudiar con datos en tiempo real de las variables fundamentales de este sistema. Todo esto es necesario para garantizar la integridad de la tubería del gasoducto de distribución de la empresa Gases del Caribe S.A.

3. Marco Referencial

3.1 Antecedentes Investigativos

La corrosión en metales a través del tiempo ha logrado ser un tema muy importante en trabajos científicos que se han enfocado en el estudio de cómo prevenir y controlar este

fenómeno, el cual es considerado uno de los problemas más relevantes en industrias cuya operación dependen directamente de transportar sus productos mediante tuberías metálicas enterradas.

El avance de la ciencia en sus diferentes campos de acción ha logrado brindar durante la historia fundamentos teórico prácticos confiables en la aplicación de métodos que ayudan a mitigar las consecuencias de la corrosión que se presenta en los metales. A continuación, se describen algunos de los aportes más representativos reportados en la literatura, relacionados con el estudio de la corrosión y la protección catódica.

Kessler, et al. (2000). Evaluaron el comportamiento de las baterías de larga duración diseñadas específicamente como fuente de alimentación para sistemas de protección catódica por corriente impresa cargadas por paneles fotovoltaicos que están comprobados como potencia efectiva y confiable para sistemas de protección catódica, efectuaron 2 pruebas de laboratorio y 29 pruebas de campo donde pudieron observar el desempeño y comportamiento de la vida útil de las baterías a diferentes condiciones, mediante un sistema de adquisición de datos y telemetría para monitoreo remoto, concluyeron que las baterías son capaces de suministrar y mantener satisfactoriamente los requerimientos de una protección catódica por corriente impresa, así mismo Sneath (2000) propuso el monitoreo remoto de la operación de los sistemas de protección catódica de 39,000 km de tubería que opera la compañía Transcanada, ya que las actividades de visitas al sitio y lecturas manuales representaba una tarea lenta y costosa de los 1300 rectificadores en la red de tuberías, más de 40 sitios son accesibles solo por helicóptero y solo se puede acceder a 15-20 sitios adicionales en los meses de invierno con máquinas de nieve, raquetas de nieve o helicópteros. Finalmente logró implementar el monitoreo remoto de la toma de potenciales a un sistema SCADA.

Calderón et al. (2005). Analizaron los factores que intervienen en la corrosión de las tuberías enterradas aplicando técnicas experimentales y estadísticas. El estudio permitió obtener la primera aproximación a la evaluación de la corrosividad de la zona y clasificar de manera adecuada los tramos de tubería pertenecientes a cada tipo de suelo, de acuerdo con la corrosividad del terreno cabe resaltar que este estudio fue realizado en una zona residencial de la ciudad de Medellín- Colombia, de la misma forma Zavala et al (2006) Evaluaron el criterio que se recomienda para estructuras metálicas enterradas o sumergidas bajo condiciones especiales, tales como altas temperaturas ($> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$), los valores de pH ácido y la presencia de bacterias, entre otros, para estos casos se sugiere tomar el potencial de acero hasta $-0.950\text{ V vs. Cu / CuSO}_4$. Sin embargo, con respecto a este potencial de protección, hay ciertas dudas acerca de la eficacia de este valor, especialmente bajo condiciones anaerobias donde se espera la presencia de bacterias reductoras de sulfato. Mediante esta investigación se logró determinar el efecto de bacterias reductoras de sulfato en la protección catódica de XL 52 de acero, con el fin de identificar si el valor potencial de $-0.950\text{ V vs. Cu / CuSO}_4$ es lo suficientemente bueno como para proteger la superficie del metal. Durante los experimentos, se monitorearon los diferentes parámetros de funcionamiento: H_2 , la producción de S, la concentración de hierro, la alcalinidad de electrolito, la población de microorganismos, así como el daño en la superficie de metal. Al mismo tiempo, la velocidad de corrosión la calcularon usando dos técnicas electroquímicas: resistencia a la polarización y espectroscopía de impedancia electroquímica. Según los resultados obtenidos concluyeron que el potencial de protección de $-0,950\text{ V vs Cu / CuSO}_4$ no es suficiente para controlar la corrosión inducida microbiológicamente. Esta situación se ve reforzada por el hecho de que una concentración significativa de hierro se encontró en el electrolito.

De manera semejante Dávila et al. (2007). Estudiaron la corrosión en tuberías por medio de un equipo de radiografía industrial, realizaron diversas exposiciones radiográficas en varias secciones de tubos iguales, cada ensayo con un grado de ataque corrosivo diferente, revelaron las películas y analizaron con el fin de caracterizar mediante imágenes diagnósticas el tipo de ataque corrosivo, el grado de avance de la corrosión y estimaron el espesor perdido a través de la técnica radiográfica tangencial. Este estudio contribuyó al conocimiento de la evolución de la corrosión en la industria del petróleo y los gasoductos urbanos, pero hacen la aclaración que la evaluación radiográfica tiene la limitación que solamente evalúa una región específica del tubo.

De la misma forma Velázquez et al. (2011). Presentaron en su trabajo una investigación que modela la evolución del crecimiento de picaduras en tuberías de acero al carbono API-5L, utilizando un modelo determinista y un modelo estocástico considerando en ambos modelos las propiedades físicas y químicas del suelo en contacto con el ducto estudiado, así como la protección catódica y recubrimiento, todo esto para predecir el comportamiento del crecimiento de picaduras en tuberías enterradas que transportan hidrocarburos, Los datos utilizados en esta investigación los obtuvieron de 259 muestras recolectadas en el sur de México, en cada sitio midieron las siguientes propiedades del suelo como: potencial redox, pH, potencial suelo-tubo, resistividad, contenido de humedad, densidad aparente y contenido de iones, también se midió la profundidad máxima de picadura en la sección de tubo, los resultados fueron que los modelos propuestos son satisfactorios en la estimación de vida útil de los ductos en servicio, logrando así una optimización en los tiempos y costos de mantenimiento.

Rodríguez et al (2016). En su trabajo informan que en Colombia existen más de 2000 rectificadores instalados, que son de funcionamiento manual, lo que significa que el personal encargado de hacer seguimiento a la protección catódica debe movilizarse a los sitios remotos

donde están instalados estos equipos para verificar las variables, por tal motivo construyeron e implementaron un prototipo de un sistema de adquisición y monitoreo de datos para un rectificador de protección catódica usado en un ducto ubicado en Apiay, Meta – Colombia. Utilizando concretamente el concepto SHM (Structural Health Monitoring) el cual consta de una tarjeta electrónica conformado por microcontroladores y un sistema de GSM de comunicaciones donde monitorean en tiempo real las tres variables de un sistema de protección catódica (voltaje y corriente de salida del rectificador) y voltaje de protección del ducto, referenciado respecto al electrodo de Cu/CUSO₄, finalmente los resultados logrados en este proyecto permitieron implementar un sistema de monitoreo y visualización remota de las variables principales de un sistema de protección catódica usado en ductos. Desarrollaron un algoritmo basado en el concepto de SHM, el cual permite correlacionar, generar tendencia y establecer criterios de funcionamiento del sistema de protección catódica que permiten establecer si el sistema está asegurando la integridad estructural del ducto de transporte de crudo, de igual modo Hernandez et al. (2017). Evaluaron a nivel experimental durante 4 meses el sistema de protección catódica de un gasoducto localizado en el estado de Tabasco México y concluyeron que el sistema de protección catódica a lo largo del gasoducto presenta diferentes agresividades corrosivas, debido a los distintos tipos de terrenos que atraviesa, consideraron que el gasoducto no había estado protegido adecuadamente con el sistema de protección catódica existente y finalmente propusieron la instalación de camas anódicas adicionales, para extender la vida útil del ducto y disminuir los riesgos sociales y ambientales, igualmente Groysman, (2017) realizó un estudio donde analizó y describió los problemas de corrosión y sus soluciones en las industrias de petróleo, gas, refinería y petroquímica, en su trabajo concluye la importancia de seguir una buena gestión de integridad referente a la corrosión en los sistemas de gas natural, ya que existe un alto

peligro para los seres humanos y el medio ambiente en el caso de presentarse fugas de gases tóxicos y explosivos, expresa la filosofía de los métodos de prevención contra la corrosión también tiene la intención de seguir su eficacia y por ultimo resalta que si la corrosión no se administra, es decir, no se controla o impide puede resultar en catástrofes, por lo tanto, la producción de petróleo y gas, refinerías y plantas petroquímicas deben manejar sus unidades de forma segura. Para ello, tienen que hacer esfuerzos para controlar los procesos tecnológicos y organizar estrategias de gestión de la corrosión con el fin de disminuir los riesgos de accidentes de la corrosión al mínimo.

De manera semejante Petrie et al (2017), expusieron en su investigación, como es el seguimiento de la gestión de integridad en ductos para la protección catódica, indicaron que la toma de datos de seguimiento de un sistema de protección catódica se recoge periódicamente y se utilizan para compararlos con los estándares de la reconocida Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE International) quienes dan criterios para una protección catódica adecuada. Sin embargo, las técnicas ampliamente utilizadas para el seguimiento de protección catódica por lo general no permiten la recolección de datos precisos y consistentes. Además, a diferencia de la mayoría de los otros tipos de supervisión regulatoria, la mayor parte de datos recogidos en cada momento de protección catódica no es repetible, por lo tanto, no hay un documento en tiempo real de estas mediciones que deje su trazabilidad y sea verificable, en síntesis, los autores propusieron el uso de análisis automatizado de forma de onda en las variables de seguimiento de la toma de muestras de un sistema de protección catódica, ya que produce datos precisos y repetibles. También se puede utilizar para producir documentos de calidad para la verificación de trazabilidad de regulación, aseguran que, implementado el análisis de forma de onda en la recolección de datos en tiempo real, los operadores pueden generar un

conjunto de datos más completos que se puede repetir, auditar y defender asegurando al mismo tiempo se utilizan los criterios apropiados NACE. Esta tecnología da como resultado datos más precisos optimizado “apagado instantáneo”, conjuntamente se genera una curva de tendencia de la despolarización durante la muestra de apagado instantáneo, evitando muestras secundarias innecesarias.

3.2. Marco Teórico - Conceptual

3.2.1 Teoría de la corrosión

El desarrollo de la presente tesis está cimentado en los conceptos de la Asociación Nacional Americana de Ingenieros de la Corrosión Internacional más conocida por sus siglas en inglés como “NACE INTERNATIONAL”, quien es la entidad reconocida mundialmente como la primera autoridad de soluciones para el control de la corrosión.

3.2.2 Consideraciones termodinámicas

“La corrosión es el deterioro de un material como resultado de una reacción con el medio. Para un metal en contacto con una solución acuosa, ésta es una reacción electroquímica que implica la transferencia de carga eléctrica (electrones) a través de la interface metal /solución. La energía que existe en los metales y que hace que éstos se corroan espontáneamente proviene del proceso mediante el cual el mineral se convierte en metal. La tabla 1 es una lista de la energía libre en la formación de algunos óxidos metálicos, y especifica la cantidad de energía disponible en un metal (energía libre de Gibbs) para impulsar la reacción de corrosión.

Tabla 1

Energía libre standard ($-\Delta G_o$) de formación de algunos óxidos en Kcal/mol de óxido a 27°C

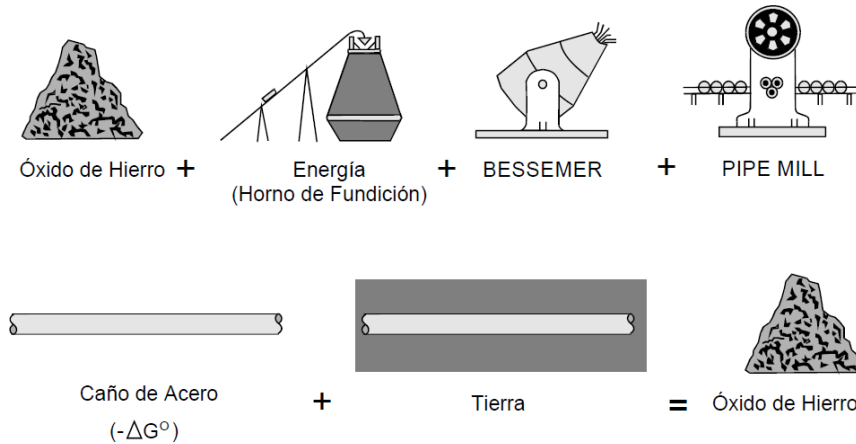
Ag ₂ O	2.55
Cu ₂ O	34.6
PbO	45.0
NiO	51.4
FeO	54.6 (a 227°C)
ZnO	76.2
MgO	136.5
Al ₂ O ₃	377.6

Nota: Datos tomados de *CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica* (p.5), por NACE INTERNATIONAL, Bogota: Manual del curso; 2007.

Esta energía, impartida al metal durante el proceso de refinación, queda disponible como energía potencial ($-\Delta G_o$) para impulsar la reacción de corrosión cuando el metal se pone en un medio acuoso. La Figura 1 ilustra este proceso para el hierro.

Figura 1

Ciclo de óxido de hierro a acero a óxido de hierro



Nota: Datos tomados de *CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica* (p.6), por NACE INTERNATIONAL, Bogota: Manual del curso; 2007.

Esto muestra que el hierro (o sus aleaciones) tenderán espontáneamente a transformarse hacia un estado de menor energía. La transformación se produce debido a un cambio en la energía libre ($-\Delta G^\circ$)” (*CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica* manual del curso, 2007, p. 6, p. 7).

3.2.3 La celda de corrosión

“La corrosión es un proceso electroquímico en el cual tiene lugar un flujo de electrones e iones. La pérdida de metal (corrosión) tiene lugar en el ánodo. En el cátodo no hay pérdida de metal (el cátodo está protegido)” (*CP2 - Cathode Protection Technician* manual del curso, 2010, p. 18). “Así, el proceso completo de la corrosión implica tanto reacciones de oxidación como de reducción que transfieren cargas a través de la interfase metal/electrolito. Llamamos a este

proceso celda electroquímica” (CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica manual del curso, 2007, p. 19), o celda de corrosión.

“Toda la actividad corrosiva tiene lugar dentro del ámbito de una celda de corrosión, la cual tiene cuatro componentes básicos:

Un ánodo (donde tiene lugar la reacción de oxidación)

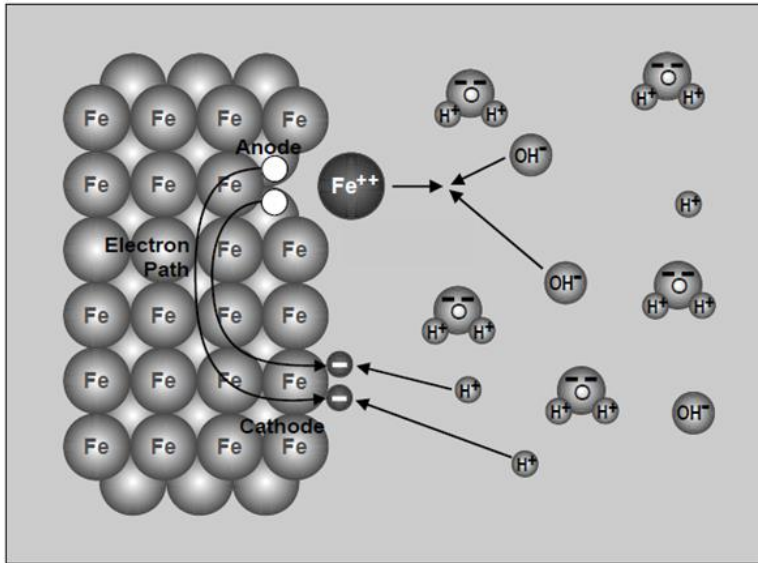
Un cátodo (donde tiene lugar la reacción de reducción)

Un paso o camino electrónico que permite a los electrones circular desde el ánodo hacia el cátodo (dentro del metal).

Un paso electrolítico que permite a los iones circular entre el ánodo y el cátodo (en el electrolito)” (CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica manual del curso, 2007, p. 20).

“Los electrones generados por la formación de iones metálicos en el ánodo pasan a través del camino electrónico hasta la superficie de las áreas catódicas inmersas en el electrolito. Al reaccionar con los iones positivos presentes en el electrolito, restauran el equilibrio eléctrico del sistema.

Examinando la Figura 2, analicemos el proceso de corrosión para una única celda de corrosión, que consiste en un único ánodo y un único cátodo sobre la misma superficie metálica en contacto con agua. El metal suministra el ánodo, el cátodo y el paso electrónico de la celda de corrosión. El agua suministra el electrolito para completar la celda de corrosión. El electrolito está ionizado, por lo que hay iones hidrógeno (H^+) y oxhidrilos (OH^-) presentes en pequeñas cantidades (10^{-7} moles/litro)” (CP2 - Cathode Protection Technician manual del curso, 2010, p. 18).

Figura 2*Celda de corrosión del hierro*

Nota: Datos tomados de *CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica* (p.19), por NACE INTERNATIONAL, Bogota: Manual del curso; 2007.

3.2.4 Sistemas de protección catódica

“Si bien el concepto de protección catódica se originó con los experimentos y trabajos de Sir Humphrey Davy y Michael Faraday, fue recién en 1938 que Mears y Brown ofrecieron la siguiente teoría de la protección catódica en los casos en que la corrosión es de naturaleza completamente electroquímica, para obtener una protección catódica total es necesario polarizar los cátodos de la celda de corrosión hasta que alcancen el potencial a circuito abierto de los ánodos locales.

La teoría de la protección catódica se comprende mejor si consideramos primero una celda de corrosión simple que consista de un ánodo y un cátodo sobre una estructura. La energía impulsora de la corriente de corrosión es la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo. Según la ley de Ohm, la magnitud de la corriente de corrosión es directamente proporcional a la

diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia del paso de corriente. Una vez que la celda de corrosión ha alcanzado la condición de estado estacionario, el potencial impulsor es la diferencia de potencial entre el potencial polarizado del ánodo y el potencial polarizado del cátodo, como se ve en la Ecuación 1.

$$I_{corr} = \frac{E_{a,p} - E_{c,p}}{R_a - R_c} \quad [1]$$

Dónde:

I_{corr} = Corriente de corrosión (A)

$E_{a,p}$ = Potencial de ánodo polarizado (V)

$E_{c,p}$ = Potencial de cátodo polarizado (V)

R_a = Resistencia del ánodo al electrolito (Ω)

R_c = Resistencia del cátodo al electrolito (Ω)

Como puede verse en el equivalente eléctrico de una celda de corrosión simple en la Figura 3, la corriente descargada desde el ánodo es exactamente la misma que la corriente captada en el cátodo, Ecuación 2.

$$I_a = I_c = I_{corr} \quad [2]$$

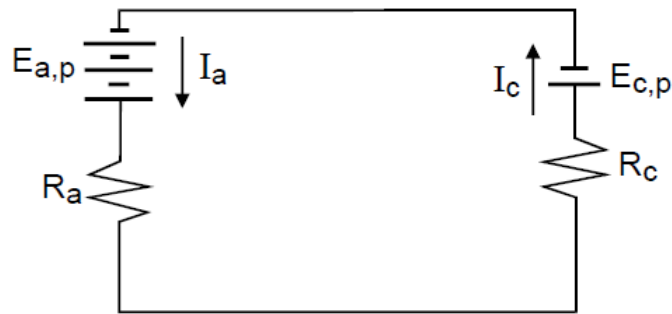
Dónde:

I_a = Corriente anódica (A)

I_c = Corriente catódica (A)

Figura 3

Circuito eléctrico de una celda de corrosión simple

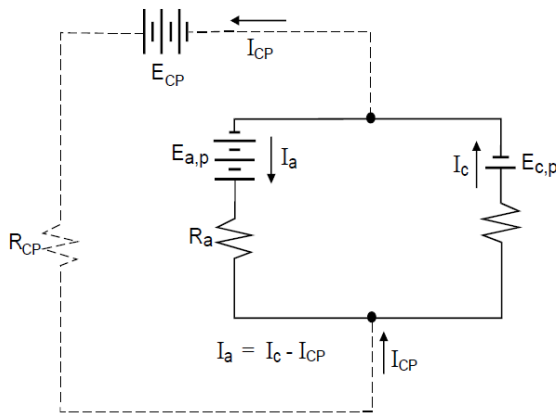


$$I_a = I_c = I_{\text{corr}} \qquad I_{\text{corr}} = \frac{E_{a,p} - E_{c,p}}{R_a + R_c}$$

Nota: Datos tomados de *CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica* (p.58), por NACE INTERNATIONAL, Bogotá: Manual del curso; 2007.

Al aplicarse protección catódica, la carga positiva circula desde una fuente externa hacia la estructura (celda de corrosión única), como puede verse en la Figura 4.

Ahora la corriente de corrosión o corriente anódica ya no es igual a la corriente catódica. De acuerdo con la ley de Kirchoff, la Ecuación 2-3 indica que la corriente de corrosión o corriente anódica es igual a la corriente catódica de la celda de corrosión menos la corriente aplicada.

Figura 4*Aplicación de corriente de protección catódica*

Nota: Datos tomados de *CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica* (p.58), por NACE INTERNATIONAL, Bogota: Manual del curso; 2007.

$$I_a = I_c - I_{cp}$$

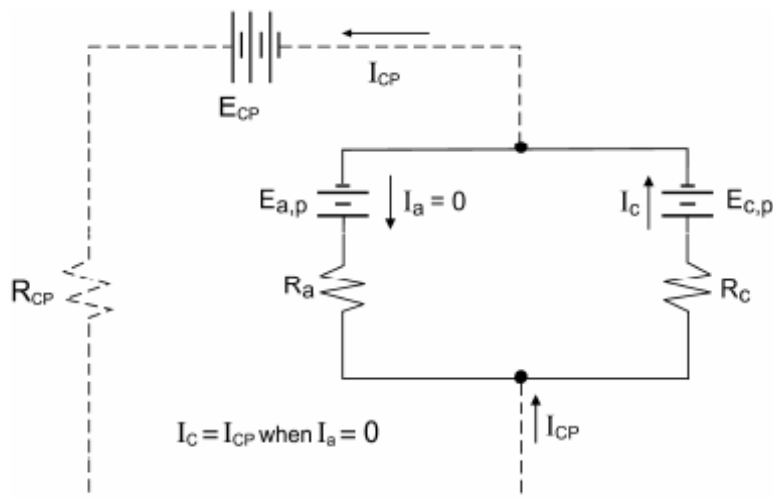
Dónde: I_{cp} = Corriente de protección catódica (A)

La celda de corrosión debe ahora alcanzar una nueva condición de estado estacionario. Dado que el cátodo sobre la estructura se encuentra a un potencial más electropositivo que el ánodo, la corriente es recogida primero en la zona catódica, suponiendo que las resistencias sean iguales. Esto hace que el cátodo se polarice más en la dirección electronegativa (reducción). Debido al aumento de polarización en el cátodo, disminuye la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo de la celda de corrosión. Esto provoca la disminución de la magnitud de la corriente de corrosión. Con menos corriente de corrosión descargándose al electrolito en la zona anódica, el ánodo se despolariza, volviéndose menos electropositivo. Se alcanza entonces una nueva condición de estado estacionario con una menor corriente de corrosión debido a la aplicación de la corriente de protección catódica.

Con cada incremento adicional de la corriente de protección catódica, la corriente de corrosión disminuye más y el ánodo continúa despolarizándose hasta alcanzar su potencial a circuito abierto. Llegado este punto, el ánodo no puede seguir despolarizándose; por lo tanto, la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo es igual a cero. Con una diferencia de potencial igual a cero, la corriente anódica se vuelve también igual a cero, el ánodo deja de existir (es decir, deja de funcionar como ánodo), y la corriente catódica es igual a la corriente de protección catódica aplicada, como muestra la Figura 5. La aplicación de más corriente a partir de este punto sólo sirve para polarizar las dos zonas, que ahora funcionan ambas como cátodos, en dirección electronegativa.

Figura 5

Detección de la corrosión



Nota: Datos tomados de *CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica* (p.59), por NACE INTERNATIONAL, Bogota: Manual del curso; 2007.

Consideremos ahora una estructura real que se corroe, con muchos ánodos y cátodos. A medida que se aplica la corriente de protección catódica, ésta ingresa a la estructura por los

cátodos y provoca la polarización de los cátodos en dirección electronegativa. Si seguimos aplicando cada vez más corriente de protección catódica, los potenciales de los cátodos se aproximan a los potenciales de los ánodos más activos. A medida que disminuyen las diferencias de potenciales, cada vez más ánodos se convierten en cátodos. Cuando la estructura se polariza tanto que alcanza el potencial a circuito abierto del ánodo más negativo (más activo), dejan de existir ánodos en la estructura, y se alcanza la protección catódica total.

Por consiguiente, el verdadero criterio para la completa protección catódica de una estructura es la polarización de los cátodos hasta alcanzar el potencial a circuito abierto del ánodo más activo de la estructura.

Dado que en este punto se detiene la corrosión, la aplicación de corriente de protección adicional es innecesaria y poco económica. Si bien este criterio es relativamente fácil de comprender, es imposible aplicarlo a los problemas de corrosión reales, porque el potencial a circuito abierto del ánodo más activo de una estructura no puede calcularse con precisión ni medirse en el campo. Por consiguiente, es necesario contar con criterios sustitutos” (CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica manual del curso, 2007, p. 57, p. 58, p.59, P60)

4. Generalidades del Sistema de Protección Catódica por Corriente Impresa Inicialmente Instalado en la Red de Gasoductos de Distribución Interdepartamental de Diámetro 8 Pulgadas Propiedad Gases del Caribe S.A. E.S.P.

4.1 Antecedentes

Gases del Caribe S.A. Empresa de Servicios Públicos es una compañía dedicada a la distribución y comercialización de gas natural en los departamentos del Atlántico, Bolívar (parte norte), Cesar y Magdalena, con más de 50 años en el mercado, cuenta con una cobertura del 87,53% en el área de influencia y abastece un total de un millón diez mil ciento ochenta y cinco (1.010.185) usuarios en la actualidad.

La empresa tiene instalado un total de 15024 Kilómetros de tuberías para la distribución de gas natural, de los cuales el 98% corresponde a tuberías de polietileno y tan solo un 2% corresponde a tuberías de acero al carbono.

Ese reto de utilizar tuberías de acero para la distribución de gas natural fue el resultado de un proyecto en alianza con los productores Petróleos Sudamericanos Energy “Petrosud” y Texican Oil & Gas, que se realizó en los años 2014 y 2015, donde se construyó un gasoducto de distribución entre los departamentos del Cesar y Magdalena en tubería de acero al carbono de 8” de diámetro API 5L X52 SCHEDULE 40 con recubrimiento en tricapa de polipropileno, con una longitud de 268.2 Km. Mediante el cual se podrían aprovechar el gas producido en los campos menores El difícil y Maracas, siendo esta una alternativa para garantizar el servicio de gas natural a los usuarios de estos departamentos, teniendo una alternativa de suministro, frente a la problemática del desabastecimiento de gas natural por la disminución de la producción en los

principales yacimientos que proveen el gas natural a la costa atlántica como los son los campos en la Guajira (Chuchupa y Ballenas) y en Sucre (Guepaje y La Creciente).

El gasoducto construido distribuye aproximadamente 20 MMSCFD en la actualidad a los usuarios de los departamentos del Cesar y Magdalena, provenientes de los campos menores El Difícil y Maracas.

La operación y mantenimiento de estos gasoductos de acero que entraron en operación en el año 2015, acarrearón múltiples desafíos y nuevas tareas que cubrir, como la protección activa de la tubería de acero mediante un sistema de protección catódica.

4.2 Información de los Campos Menores El Difícil y Maracas

Campo El Difícil se encuentra localizado en el Valle Inferior del Magdalena (VIM), Subcuenca Plato, en el municipio de Ariguaní, departamento del Magdalena, Colombia. y es operado por la compañía Petróleos Sudamericanos Energy “Petrosud”.

En la tabla 2, tabla 3 y tabla 4, se relacionan los principales datos del campo El Difícil:

Tabla 2

Información general campo El Difícil

Localización	Departamento del Magdalena, Municipio Ariguaní, Colombia
Cuenca Sedimentaria	Valle Inferior del Magdalena (VIM), Subcuenca Plato
Tipo de Yacimiento	Gas Rico, Anillo de Crudo Liviano (42°API) y Capa de Gas
Operador	Petróleos Sudamericanos Energy (Petrosud)
Producción Actual	Qg=19MMSCF/D 21000MMBTU/D
	Qo=280bls/d
	Qw=2500bls/d

Nota: Oscar Eduardo. (2018). *Scrip* . Obtenido de <https://es.scribd.com/document/395311969/Experiencias-en-El-Campo-El-Difícil>

Tabla 3*Cromatografía del gas producido en campo El Difícil*

COMPONENTE	FÓRMULA	COMPOSICIÓN PORCENTAJE MOLAR
Metano	CH ₄	90.6153
Etano	C ₂ H ₆	4.555
Propano	C ₃ H ₈	2.3441
i-Butano	C ₄ H ₁₀	0.4487
n-Butano	C ₄ H ₁₀	0.6248
i-Pentano	C ₅ H ₁₂	0.2016
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	0.1132
neo-Pentano	C ₅ H ₁₂	0
Hexano +	C ₆ +	0.181
Dióxido de Carbono	CO ₂	0
Nitrógeno	N ₂	0.9164
Agua	H ₂ O	0
Monóxido de Carbono	CO	0
Sulfuro de Hidrogeno	H ₂ S	0
Oxígeno	O ₂	0
TOTAL		100

Nota: Obtenido del Área de Operación y Mantenimiento de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

Tabla 4*Propiedades del gas El Difícil*

Propiedad	Valor
Densidad	47.9434967
Gravedad Especifica	0.62853009
Poder calorífico bruto real, (@P _b y T _b), a 14.65 psia y 60°F (BTU/PC):	1107.511597

Nota: Obtenido del Área de Operación y Mantenimiento de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

Campo Maracas está situado en la cuenca del Cesar, en el municipio de El Paso, departamento del Cesar, Colombia. y es operado por la compañía Texican Oil & Gas.

En la tabla 5, tabla 6 y tabla 7, se relacionan los principales datos del campo Maracas:

Tabla 5*Información general campo Maracas*

Información Campo Maracas	
Localización	Departamento del Cesar, Municipio El Paso, Colombia
Cuenca Sedimentaria	Cuenca del Cesar
Tipo de Yacimiento	Gas Seco
Operador	Texicam Oil Company
Producción Actual	Qg= 5 MMSCFD

Nota: TEXICAN OIL PLC, (2019). Obtenido de <http://texican-oil.com/ftp/spMaracas.pdf>

Tabla 6*Cromatografía del gas producido en campo Maracas*

COMPONENTE	FÓRMULA	COMPOSICIÓN PORCENTAJE MOLAR
Metano	CH ₄	96.6558
Etano	C ₂ H ₆	0.7465
Propano	C ₃ H ₈	0.0213
i-Butano	C ₄ H ₁₀	0.0095
n-Butano	C ₄ H ₁₀	0
i-Pentano	C ₅ H ₁₂	0
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	0
neo-Pentano	C ₅ H ₁₂	0
Hexano +	C ₆ +	0
Dióxido de Carbono	CO ₂	2.3981
Nitrógeno	N ₂	0.1689
Agua	H ₂ O	0
Monóxido de Carbono	CO	0
Sulfuro de Hidrogeno	H ₂ S	0
Oxígeno	O ₂	0
TOTAL		100

Nota: Obtenido del Área de Operación y Mantenimiento de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

Tabla 7

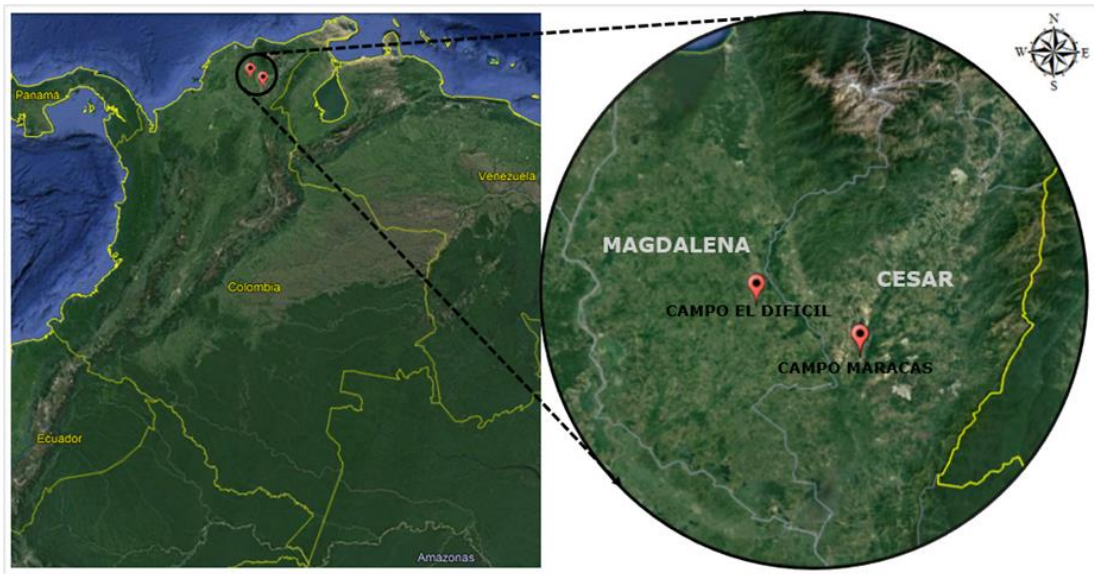
Propiedades del gas Maracas

Propiedad	Valor
Densidad (Kg/m3)	0.71256411
Gravedad Específica	0.58267111
Poder calorífico bruto real, (@Pb y Tb), a 14.65 psia y 60°F (BTU/PC):	989.2221069

Nota: Obtenido del Área de Operación y Mantenimiento de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

Figura 6

Ubicación geográfica de los campos menores El Dificil y Maracas



Nota: (Autor, 2021). En esta figura los puntos señalados en rojo representan la ubicación georreferenciada de los campos productores de gas natural El Dificil y Maracas.

4.3 Localización del Gasoducto

El gasoducto construido tiene una longitud total de 268,2 Kilómetros en tubería de acero al carbono de 8 pulgadas de diámetro API 5L X52 SCHEDULE 40 además posee las siguientes consideraciones:

Tramo #1 Pueblo Nuevo - Bosconia - Cuatro Vientos (Longitud: 67Km)

Tramo #2 Bosconia - Tukurinca (Longitud:94Km)

Tramo #3 Bosconia - Valledupar (Longitud: 96 Km)

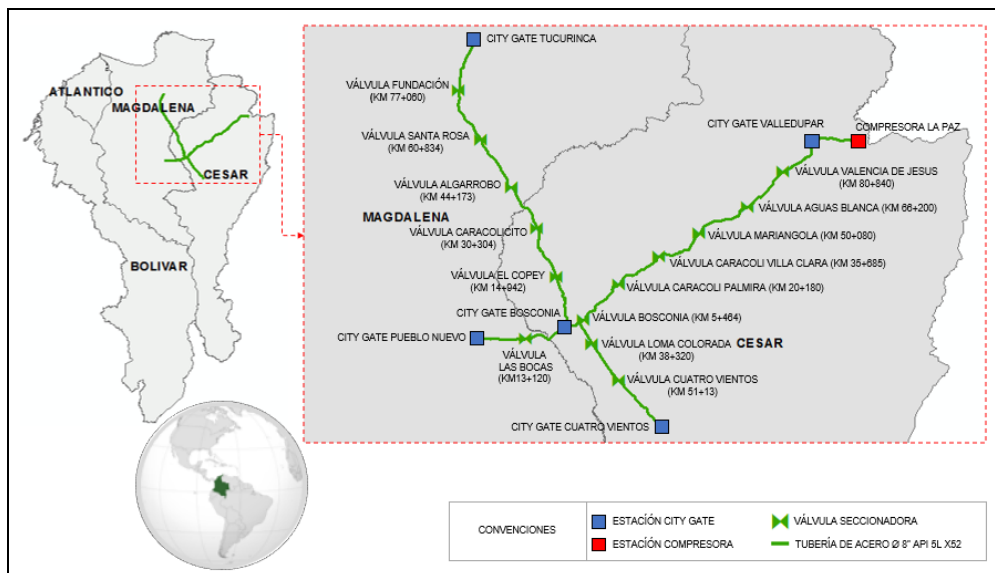
Tramo #4 Valledupar - La Paz (Longitud: 11,2 Km).

5 estaciones de regulación y medición puertas de ciudad “City Gates”.

14 válvulas de seccionamiento.

Figura 7

Ubicación geográfica del gasoducto de 8”



Nota: (Autor, 2021) En esta figura se representa la ubicación georreferenciada del trazado del gasoducto de acero 8”, válvulas seccionadoras y estaciones, del gasoducto de

interconexión de los departamentos Magdalena – Cesar, propiedad de Gases del caribe S.A. Empresa de Servicios Públicos.

4.4 Operación

Con el objeto de mitigar la amenaza de la corrosión externa, en la red de gasoductos de Gases de Caribe S.A E.S.P, en los departamentos del Magdalena y Cesar, con longitud 268.2 kilómetros, Gases del Caribe S.A. Empresa de Servicios Públicos, se vio en la necesidad de implementar un sistema de protección catódica por corriente impresa, para complementar el sistema de recubrimientos que trae la tubería misma.

Por ese motivo construyó un sistema de protección catódica (SPC), dividido en tres segmentos independientes para la red de gasoductos, en los departamentos del Magdalena y Cesar, con longitud de 268,2 kilómetros, con las siguientes descripciones:

4.4.1 Sistema de protección catódica # 1

Sistema de protección catódica por corriente impresa con cama anódica convencional horizontal, de lecho continuo, ubicado en el sector de la válvula de Mariangola, sobre el gasoducto Bosconia-Valledupar (PK 48+700). Tiene una cama anódica conformada por 7 ánodos Metal Mixed Oxide (MMO) de 1” de diámetro y 39,4” de longitud y capacidad de corriente de 11 amperios y es energizada a través de un rectificador enfriado en aceite de 5 A y 65 V.

4.4.2 Sistema de protección catódica # 2

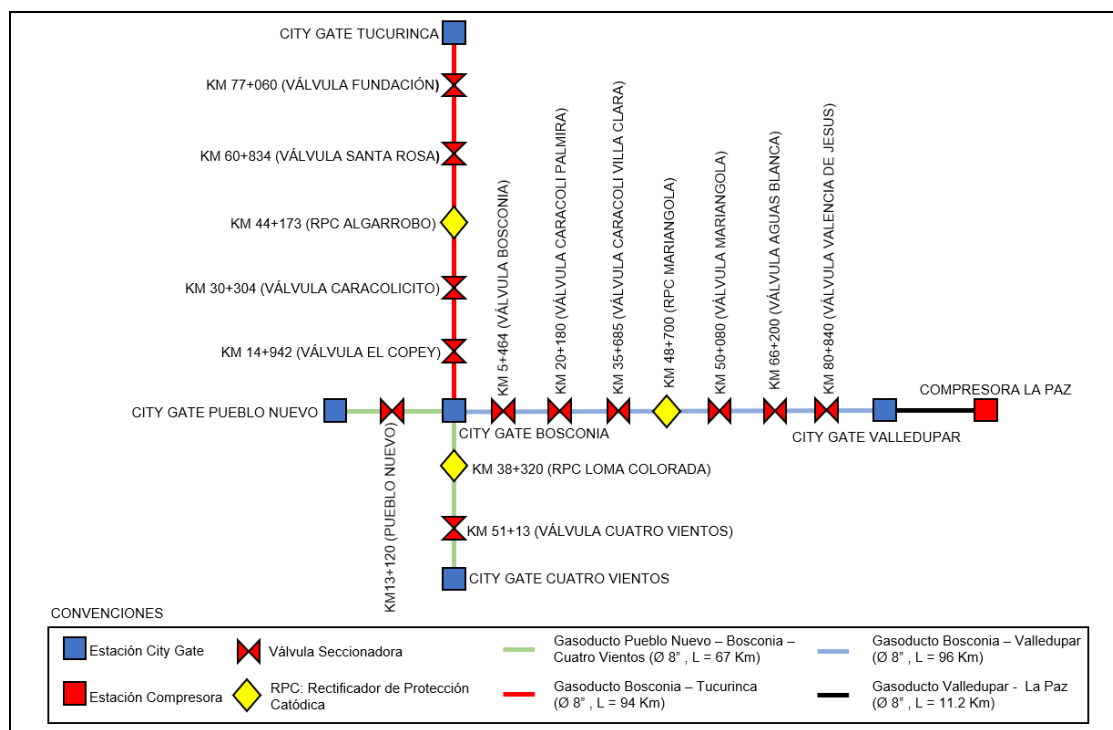
Sistema de protección catódica por corriente impresa con cama anódica convencional horizontal, de lecho continuo, ubicado en el sector de la válvula de seccionamiento Algarrobo, sobre el gasoducto Bosconia-Tucurín (PK 44+500). Tiene una cama anódica conformada por 5 ánodos Metal Mixed Oxide (MMO) de 1”x39,4” y capacidad de corriente de 11 amperios y es energizada a través de un rectificador enfriado en aceite de 10 A y 60 V.

4.4.3 Sistema de protección catódica # 3

Sistema de protección catódica por corriente impresa con cama anódica convencional horizontal, de lecho continuo, ubicado en la válvula de seccionamiento Loma Colorada, sobre el gasoducto Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (PK 38+400). Tiene una cama anódica conformada por 6 ánodos Metal Mixed Oxide (MMO) de 1"x39,4" y capacidad de corriente de 11 amperios y es energizada a través de un rectificador enfriado en aceite de 10 A y 60 V.

Figura 8

Esquema general de la configuración del sistema de protección catódica instalado



Nota: Obtenido del Área de Operación y Mantenimiento de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020). En esta figura se ilustra un esquema general del sistema de protección catódica inicialmente construido en la red de gasoductos de interconexión magdalena – Cesar, propiedad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.

En la operación de estos sistemas, se logró evidenciar que la mayor parte del tiempo, los rectificadores estaban sin suministro de energía eléctrica convencional, por lo tanto, se pudo concluir que los gasoductos estaban desprotegidos frente a la corrosión. La causa principal de este fallo y su repetitividad es por la ineficiencia del suministro eléctrico de las zonas donde están instalados los rectificadores, siendo la empresa distribuidora de energía eléctrica de la costa atlántica la principal responsable de esta problemática.

5. Dimensionamiento del Sistema de Energía Fotovoltaico que va a Alimentar el Nuevo Sistema de Protección Catódica de la Red de Gasoductos

La búsqueda de autonomía energética frente al suministro de la energía eléctrica convencional abrió el camino para la implementación de un sistema de energía solar fotovoltaica para la alimentación del sistema de protección catódica del gasoducto de interconexión de los departamentos Magdalena Cesar.

Para realizar el cálculo de dimensionamiento es necesario conocer cuanta energía necesita el sistema de protección catódica, para garantizar un óptimo funcionamiento.

5.1 Criterio de Protección Catódica

La filosofía de operación sobre la cual se diseña el desempeño del sistema de protección catódica propuesto establece como criterio de protección un potencial polarizado de -0,85 Voltios DC, con respecto a electrodo portátil de cobre sulfato de cobre (Cu/CuSO_4), con el objeto de garantizar una protección efectiva. Como criterio límite de protección se adopta un máximo valor de protección, un potencial polarizado de -1,2 Voltios DC polarizados, con

respecto a electrodo portátil de Cu/CuSO₄, con el objeto de prevenir posible afectación del recubrimiento.

5.2 Resultados de las Pruebas de Inyección de Corriente en la Red de Gasoductos para Evaluar su Requerimiento

Para determinar la corriente requerida a emplear en los cálculos de diseño, de los sistemas de protección catódica, se realizaron pruebas de inyección de corriente en campo, en cada uno de los gasoductos a proteger. A continuación en la tabla 8, tabla 9 y tabla 10, se presentan los datos y resultados de las pruebas de inyección de corriente, para el criterio de -0,85 V DC polarizados Cu/CuSO₄.

Tabla 8

Resultados prueba de corriente gasoducto Bosconia - Valledupar

CONDICIONES DEL ENSAYO PRUEBA DE CORRIENTE GASODUCTO BOSCONIA - VALLEDUPAR							
Voltaje de Salida:		1.9 Voltios		Punto de Inyección:		City Gate Bosconia	
Corriente de Salida:		0.382 Amperios		Criterio Utilizado:		-850mV	
Ítem	Línea / Sector	Abscisa	Potencial Natural (Vdc)	Potencial ON	Potencial Instant OFF (Vdc)	Diferencia (mVdc)	Corriente Requerida (mA)
1	City Gate Bosconia	0+000	-0.685	-1.471	-1.01	325	320
2	Válvula Caracolí Villa Clara	32+400	-0.567	-1.291	-0.987	420	350
3	Estación Mariangola	44+800	-0.685	-1.491	-1.001	316	320
4	Válvula Mariangola	50+080	-0.586	-1.56	-1.106	520	228.2
5	Válvula Aguas Blancas	66+200	-0.625	-1.099	-0.816	191	650
6	Válvula Valencia de Jesus	80+840	0.633	-1.36	-1.093	1726	298.99
7	City Gate Valledupar	96+000	0.641	-1.313	-1.032	1673	310.02
8	Estación Compresora La Paz	+ 11.2 Km	0.433	-1.155	-0.927	1360	331.51

Nota: Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

De acuerdo con los resultados de las pruebas de inyección de corriente, se concluye que el requerimiento de corriente para proteger 96 Km. del gasoducto Bosconia – Valledupar +

11,2Km del ramal Valledupar- La Paz, es de aproximadamente 650mA, el cual corresponde al mayor valor calculado en las abscisas evaluadas.

Tabla 9

Resultados prueba de corriente gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia – Cuatro Vientos

CONDICIONES DEL ENSAYO PRUEBA DE CORRIENTE GASODUCTO PUEBLO NUEVO - BOSCONIA - CUATRO VIENTOS							
Voltaje de Salida:		1.9 Voltios		Punto de Inyección:		City Gate Pueblo Nuevo	
Corriente de Salida:		0.382 Amperios		Criterio Utilizado:		-850mV	
Ítem	Línea / Sector	Abscisa	Potencial Natural (Vdc)	Potencial ON	Potencial Instant OFF (Vdc)	Diferencia (mV)	Corriente Requerida (mA)
1	City Gate Pueblo Nuevo	0+000	-0.579	-1.395	-1.07	491	129.96
2	City Gate Bosconia	27+600	-0.587	-1.431	-1.099	512	121.95
3	City Gate Cuatro Vientos	66+200	-0.602	-1.23	-0.975	373	195.92

Nota: Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

De acuerdo con los resultados de las pruebas de inyección de corriente, se concluye que el requerimiento de corriente para proteger 66,2 Km del gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia - Cuatro Vientos, es de aproximadamente 196mA, el cual corresponde al mayor valor calculado en las abscisas evaluadas.

Tabla 10

Resultados prueba de corriente gasoducto Bosconia - Tucurínca

CONDICIONES DEL ENSAYO PRUEBA DE CORRIENTE GASODUCTO BOSCONIA - TUCURINCA							
Voltaje de Salida:		1.9 Voltios		Punto de Inyección:		City Gate Bosconia	
Corriente de Salida:		0.382 Amperios		Criterio Utilizado:		-850mV	
Ítem	Línea / Sector	Abscisa	Potencial Natural (Vdc)	Potencial ON	Potencial Instant OFF (Vdc)	Diferencia (mV)	Corriente Requerida (mA)
1	City Gate Bosconia	0+000	-0.65	-1.31	-0.952	302	520
2	Válvula El Copey	14+942	-0.659	-1.299	-1.014	355	430
3	Válvula Caracolito	30+304	-0.65	-1.389	-1.05	400	390
4	Válvula Algarrobo	44+177	-0.676	-1.49	-1.132	456	310
5	Válvula Santa Rosa	60+834	-0.658	-1.321	-1.025	367	420
6	Válvula Fundación	77+060	-0.682	-1.164	-0.925	243	580
7	City Gate Tucurínca	94+000	-0.654	-1.195	-0.987	333	460

Nota: Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

De acuerdo con los resultados de las pruebas de inyección de corriente, se concluye que el requerimiento de corriente para proteger catódicamente 94Km del Gasoducto Bosconia - Tukurinca, es de aproximadamente 580mA.

Para efectos de diseño de los sistemas de protección catódica, se aplica un factor de seguridad del 50%, al requerimiento de corriente calculado en cada gasoducto, previendo los incrementos normales que se presenten, como consecuencia del deterioro del recubrimiento durante su vida útil, como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11

Resumen del requerimiento de corriente por gasoducto

Descripción del sistema de protección catódica	Corriente requerida calculada (mA)	Factor de Seguridad	Corriente requerida + F.S (mA)
SPC Gasoducto Bosconia Valledupar	650	0.5	975
SPC Gasoducto Pueblo Nuevo Bosconia Cuatro Vientos	196	0.5	294
SPC Gasoducto Bosconia Tukurinca	580	0.5	870

Nota: (Autor,2021)

Teniendo en cuenta el bajo requerimiento de corriente, para proteger a red de gasoductos de Magdalena y Cesar, se consideró dimensionar los sistemas de protección catódica de la siguiente manera, como se presenta en la tabla 12.

Tabla 12*Dimensionamiento del requerimiento de corriente por gasoducto*

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA	CORRIENTE REQUERIDA
SPC Gasoducto Bosconia – Valledupar + 11.2Km a La Paz	2 Amperios
SPC Gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia - Cuatro Vientos	3 Amperios
SPC Gasoducto Bosconia - Tucurínca	3 Amperios

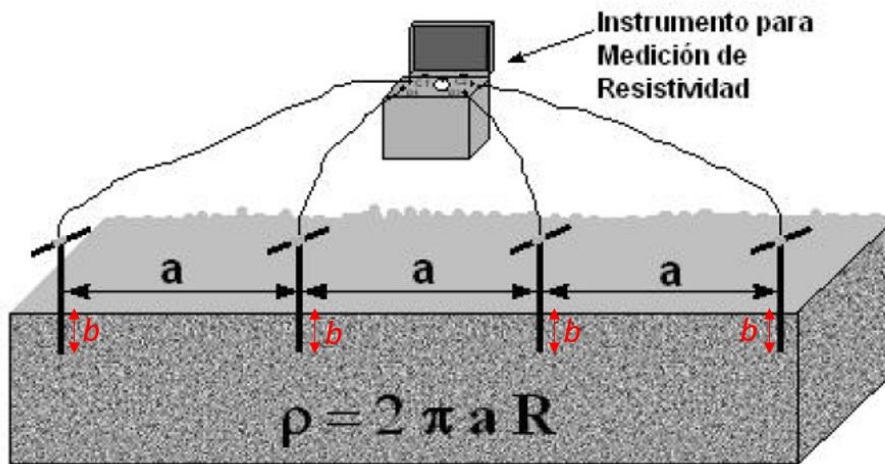
Nota: Área de Operación y Mantenimiento de Gases del Caribe S.A. E.S.P.

5.3 Cálculo de Resistividades de las Camas Anódicas Instaladas

Se realizaron mediciones de resistividad de suelos donde están instaladas las 3 camas anódicas, se calcularon utilizando el método de Wenner y el análisis de Barnes, esto para realizar los cálculos del nuevo sistema de protección catódica y evaluar si las camas anódicas instaladas tienen un buen diseño y funcionamiento, para su aprovechamiento.

5.3.1 Método de Wenner

Se utilizó el método de Wenner para calcular la resistividad promedio del terreno donde están instaladas las camas anódicas, como se describe en ASTM Test Method G57. El procedimiento consistió en ubicar 4 ánodos equidistantes en unas separaciones de 2, 4, 6, 8, 10 y 12 metros, en línea recta hincados a una profundidad de 4cm, en 2 orientaciones Noreste y Sureste. Este método permite obtener las resistividades promedias para capas profundas del terreno estudiado, sin necesidad de enterrar los electrodos a dichas profundidades. Como se muestra en la figura 9:

Figura 9*Ilustración del método de Wenner*

Nota: Datos tomados de *CP2 Cathode Protection Technician* (p.244), por NACE INTERNATIONAL, Bogota; Manual del curso; 2010.

El método de Wenner especifica que el valor de b es despreciable comparado con respecto al valor de a , si se cumple que $b \leq 5\% \cdot a$, se aplica la siguiente formula:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$$

Para este caso se corrobora que el valor de b , cumple con la consideración anteriormente mencionada, puesto que los ánodos se hincaron a 4cm de profundidad en cada toma de muestras y la separación mínima fue de 200cm.

Reemplazando los valores tenemos:

$$b \leq 5\% \cdot 200\text{cm} \rightarrow b = 10\text{cm}$$

Por lo consiguiente para determinar las resistividades promedias de los terrenos donde están instaladas las camas anódicas, se realiza mediante la siguiente formula:

$$\rho_{\text{Prom}} = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_{\text{Prom}}$$

Donde:

ρ_{Prom} : es la resistividad promedio del terreno ($\Omega \cdot \text{cm}$)

R_{Prom} : es la resistencia promedio del terreno (Ω)

a : Es la separación entre ánodos equidistantes, equivalentes a la profundidad del terreno (cm).

En la tabla 13, tabla 14 y tabla 15 se presentan los datos de las mediciones de resistividades eléctricas en los suelos de la Estación Mariangola, Válvula Algarrobo y Válvula Loma Colorada, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 13

Resistividad promedio del terreno donde está instalada la cama anódica Mariangola por el método de Wenner

DATOS INICIALES DE RESISTIVIDADES OBTENIDOS EN EL TERRENO DONDE ESTA INSTALADA LA CAMA ANÓDICA MARIANGOLA EN SENTIDOS (NORESTE) Y (SURESTE)			
Sentido de la medición	Profundidad	Resistencia	Resistividad
	(cm)	(Ω)	($\Omega \cdot \text{cm}$)
N - E	200	9.8	6158
	400	23.6	29657
	600	10.9	20546
	800	26.2	65848
	1000	36.1	113411
	1200	18.5	69743
S - E	200	11.2	7037
	400	32.4	40715
	600	13.8	26012
	800	20.7	52025

	1000	36.4	114354
	1200	21.7	81807
CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD PROMEDIO DEL TERRENO DONDE ESTA INSTALADA LA CAMA ANÓDICA MARIANGOLA POR EL MÉTODO DE WENNER			
Profundidad (cm)	Resistencia Promedio (Ω)	Resistividad Promedio (Ω *cm)	
200	10.5	6597	
400	28	35186	
600	12.35	23279	
800	23.45	58936	
1000	36.25	113883	
1200	20.1	75775	

Nota: Obtenido del Área de Operación y Mantenimiento de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

Tabla 14

Resistividad promedio del terreno donde está instalada la cama anódica Algarrobo por el método de Wenner

DATOS INICIALES DE RESISTIVIDADES OBTENIDOS EN EL TERRENO DONDE ESTA INSTALADA LA CAMA ANÓDICA ALGARROBO EN SENTIDOS (NORESTE) Y (SURESTE)			
Sentido de la medición	Profundidad (cm)	Resistencia (Ω)	Resistividad (Ω *cm)
N - E	200	0.49	308
	400	0.61	767
	600	0.78	1470
	800	1.4	3519
	1000	1.8	5655
	1200	4	15080
S - E	200	0.54	339
	400	0.69	867
	600	0.82	1546
	800	1.35	3393

	1000	1.89	5938
	1200	3.5	13195
CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD PROMEDIO DEL TERRENO DONDE ESTA INSTALADA LA CAMA ANÓDICA ALGARROBO POR EL MÉTODO DE WENNER			
Profundidad	Resistencia Promedio	Resistividad Promedio ($\Omega \cdot \text{cm}$)	
(cm)	(Ω)		
200	0.52	324	
400	0.65	817	
600	0.8	1508	
800	1.38	3456	
1000	1.85	5796	
1200	3.75	14137	

Nota: Obtenido del Área de Operación y Mantenimiento de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

Tabla 15

Resistividad promedio del terreno donde está instalada la cama anódica Loma Colorada por el método de Wenner

DATOS INICIALES DE RESISTIVIDADES OBTENIDOS EN EL TERRENO DONDE ESTA INSTALADA LA CAMA ANÓDICA LOMA COLORADA EN SENTIDOS (NORESTE) Y (SURESTE)			
Sentido de la medición	Profundidad	Resistencia	Resistividad
	(cm)	(Ω)	($\Omega \cdot \text{cm}$)
N - E	200	1.3	817
	400	1.9	2388
	600	2.6	4901
	800	2.8	7037
	1000	2.2	6912
	1200	2.4	9048
	200	1.7	1068
S - E	400	2.5	3142
	600	1.9	3581
	800	2.3	5781

	1000	1.8	5655
	1200	2.1	7917
CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD PROMEDIO DEL TERRENO DONDE ESTA INSTALADA LA CAMA ANÓDICA LOMA COLORADA POR EL MÉTODO DE WENNER			
Profundidad	Resistencia Promedio	Resistividad Promedio (Ω *cm)	
(cm)	(Ω)		
200	1.5	942	
400	2.2	2765	
600	2.25	4241	
800	2.55	6409	
1000	2	6283	
1200	2.25	8482	

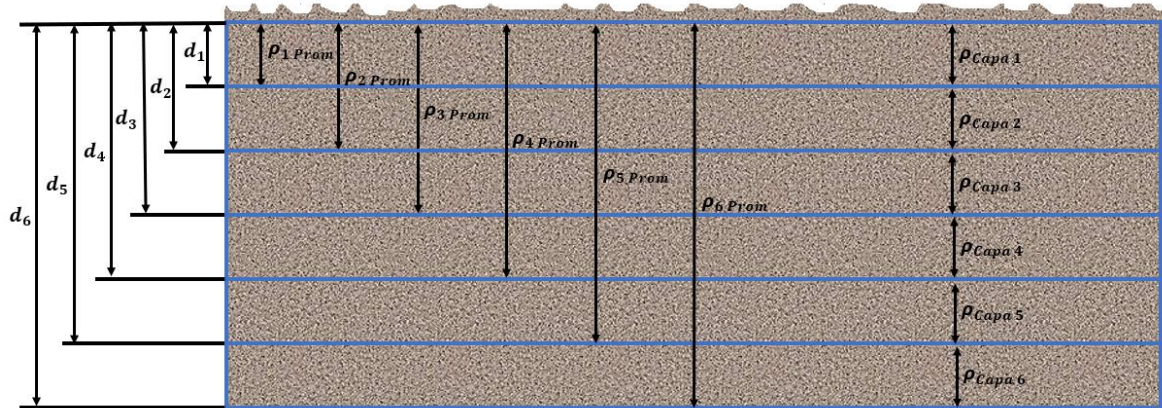
Nota: Obtenido del Área de Operación y Mantenimiento de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

5.3.2 Análisis de capas de Barnes

Mediante el método de Wenner calculamos las resistividades promedias del terreno, referente a una distancia de separación (d), pero al empelar el análisis de Barnes podemos determinar la resistividad de cada una de las capas, las cuales realmente necesitamos, como se observa la siguiente figura 10.

Figura 10

Representación gráfica del análisis de capas de Barnes



Nota: (Autor, 2021)

Para determinar la resistividad de una capa, hay que calcular la resistencia (R) de la capa empleando el análisis de Barnes, el cual establece que las capas se encuentran en paralelo y el espesor de capa es la diferencia de las profundidades (d), utilizando la fórmula de resistencias en paralelo se tiene:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Para calcular las resistencias de las capas del terreno utilizamos las siguientes expresiones:

$$\frac{1}{R_{@d1}} = \frac{1}{R_{capa1}} \rightarrow R_{capa1} = R_{@d1}$$

$$R_{capa2} = \frac{R_{@d1} * R_{@d2}}{R_{@d1} - R_{@d2}}$$

$$R_{capa3} = \frac{R_{@d2} * R_{@d3}}{R_{@d2} - R_{@d3}}$$

$$R_{capa4} = \frac{R_{@d3} * R_{@d4}}{R_{@d3} - R_{@d4}}$$

$$R_{capa5} = \frac{R_{@d4} * R_{@d5}}{R_{@d4} - R_{@d5}}$$

$$R_{capa6} = \frac{R_{@d5} * R_{@d6}}{R_{@d5} - R_{@d6}}$$

Donde:

$R_{@d1}$: Resistencia promedio del terreno a una profundidad d_1

R_{Capa1} : Resistencia de la capa 1 del terreno a una profundidad $d_{Capa1} = d_1$

$R_{@d2}$: Resistencia promedio del terreno a una profundidad d_2

R_{Capa1} : Resistencia de la capa 2 del terreno a una profundidad $d_{Capa2} = d_2 - d_1$

$R_{@d3}$: Resistencia promedio del terreno a una profundidad d_3

R_{Capa3} : Resistencia de la capa 3 del terreno a una profundidad $d_{Capa3} = d_3 - d_2$

$R_{@d4}$: Resistencia promedio del terreno a una profundidad d_4

R_{Capa4} : Resistencia de la capa 4 del terreno a una profundidad $d_{Capa4} = d_4 - d_3$

$R_{@d5}$: Resistencia promedio del terreno a una profundidad d_5

R_{Capa5} : Resistencia de la capa 5 del terreno a una profundidad $d_{Capa5} = d_5 - d_4$

$R_{@d6}$: Resistencia promedio del terreno a una profundidad d_6

R_{Capa6} : Resistencia de la capa 6 del terreno a una profundidad $d_{\text{Capa6}} = d_6 - d_5$

Después se calcula la resistividad de cada capa aplicando la siguiente formula:

$$\rho_{\text{Capa}} = 2 * \pi * d * R_{\text{Capa}}$$

Tabulando los resultados de datos de las ecuaciones anteriores tenemos lo siguiente:

Tabla 16

Análisis de Barnes para cálculo de resistividad cama anódica Mariangola

MÉTODO DE WENNER PARA CÁLCULO DE RESISTIVIDAD PROMEDIO			ANÁLISIS DE BARNES PARA LA RESISTIVIDAD DE LAS CAPAS		
Profundidad d	Resistencia Prom	Resistividad Prom	Capas	Resistencia Capa	Resistividad Capa ($\Omega \cdot \text{cm}$)
(cm)	(Ω)	($\Omega \cdot \text{cm}$)	(m)	(Ω)	
200	10.5	6,597	0 - 2	10.5	6,597
400	28	35,186	2 - 4	16.8	10,556
600	12.35	23,279	4 - 6	22.1	13,883
800	23.45	58,936	6 - 8	26.09	16,393
1000	36.25	113,883	8 - 10	66.41	41,727
1200	20.1	75,775	10 - 12	45.12	28,347

Nota: (Autor,2021)

Tabla 17

Análisis de Barnes para cálculo de resistividad cama anódica Algarrobo

MÉTODO DE WENNER PARA CÁLCULO DE RESISTIVIDAD			ANÁLISIS DE BARNES PARA LA RESISTIVIDAD DE LAS CAPAS		
Profundidad	Resistencia	Resistividad prom ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Capas	Resistencia Capa (Ω)	Resistividad Capa ($\Omega \cdot \text{cm}$)
(cm)	Ω		(m)		
200	0.515	324	0 - 2	0.515	324
400	0.65	817	2 - 4	2.4796	1,558
600	0.8	1,508	4 - 6	3.4667	2,178
800	1.375	3,456	6 - 8	1.913	1,202

1000	1.845	5,796	8 - 10	5.3976	3,391
1200	3.75	14,137	10 - 12	3.6319	2,282

Nota: (Autor,2021)

Tabla 18

Análisis de Barnes para cálculo de resistividad cama anódica Loma Colorada

MÉTODO DE WENNER PARA CÁLCULO DE RESISTIVIDAD			ANÁLISIS DE BARNES PARA LA RESISTIVIDAD DE LAS CAPAS		
Profundidad	Resistencia	Resistividad prom ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Capas	Resistencia Capa (Ω)	Resistividad Capa ($\Omega \cdot \text{cm}$)
(cm)	Ω		(m)		
200	1.5	942	0 - 2	1.5	942
400	2.2	2,765	2 - 4	4.7143	2,962
600	2.25	4,241	4 - 6	99	62,204
800	2.55	6,409	6 - 8	19.125	12,017
1000	2	6,283	8 - 10	9.2727	5,826
1200	2.25	8,482	10 - 12	18	11,310

Nota: (Autor,2021)

De acuerdo con los resultados de mediciones de resistividad eléctrica, en los sitios donde están instaladas las camas anódicas convencionales, se determinaron los siguientes valores de resistividad:

Cama anódica Válvula Mariangola: 10556 ohm*cm (capa entre 2-4 metros de profundidad).

Cama anódica Válvula Algarrobo: 1558 ohm*cm (capa entre 2-4 metros de profundidad).

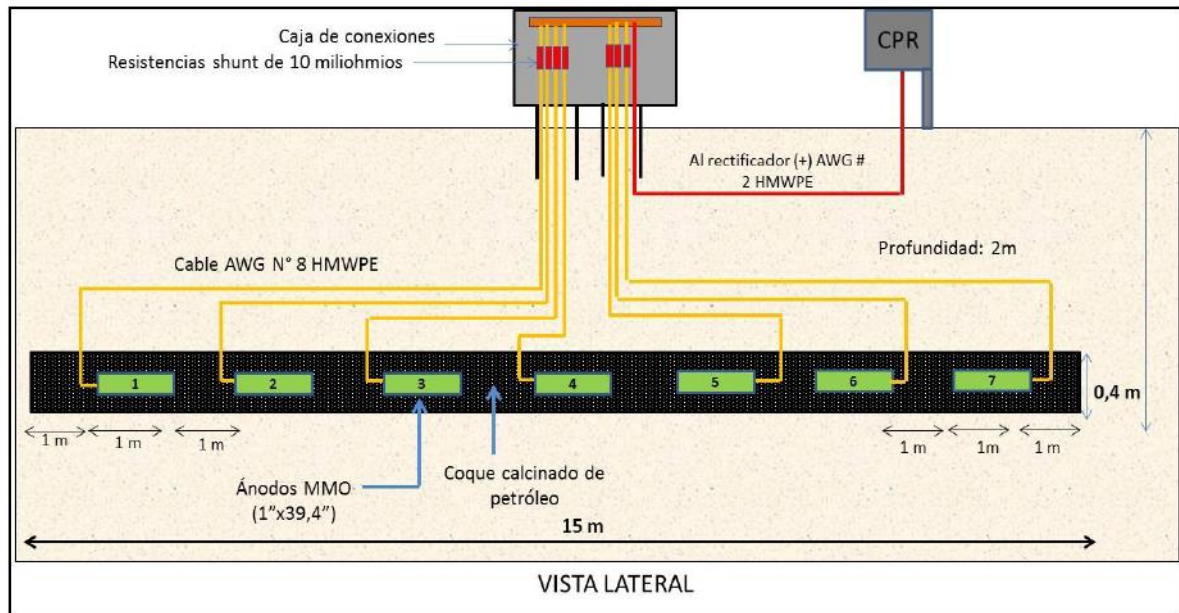
Cama anódica Válvula Loma Colorada: 2962 ohm*cm (capa entre 2-4 metros de profundidad).

5.4 Evaluación de las Camas Anódicas Instaladas

Se evaluaron los criterios de diseños de las camas anódicas instaladas inicialmente en el antiguo sistema de protección catódica, para corroborar si cumplen con un buen diseño y funcionamiento.

5.4.1 Cama anódica estación Mariangola

La cama anódica instalada en la Válvula Mariangola está conformada por siete (7) ánodos Metal Mixed Oxide (MMO) de 1” de diámetro y 39,4” de longitud, con separación inter-anódica de 1 metro (entre el extremo de un ánodo y el inicio del siguiente ánodo) y una profundidad de 2 metros. Los ánodos tienen instalados un relleno de coque calcinado de petróleo de 15m de longitud y 40 cm de diámetro, cada ánodo posee un cable calibre 8 AWG recubierto con aislamiento tipo HMWPE, con longitud suficiente para conectarlo a la caja de conexiones de positivos (JBP), esta se representa en la figura 11.

Figura 11*Ilustración cama anódica Mariangola*

Nota: Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.

Tabla 19*Parámetros de la cama anódica instalada en Mariangola*

RESUMEN DE LOS PARÁMETROS	
CORRIENTE REQUERIDA	5 amperios
CANTIDAD DE ÁNODOS MMO INSTALADOS	7 ánodos
LONGITUD TOTAL DE LA CAMA ANÓDICA (L)	15 metros
RESISTENCIA TOTAL DEL CIRCUITO	12.55 ohmios
CORRIENTE DE SALIDA DEL RECTIFICADOR INSTALADO	5 amperios
VOLTAJE DE SALIDA DEL RECTIFICADOR INSTALADO	65 voltios
CANTIDAD DE COQUE INSTALADO	2300 kilogramos

Nota: (Autor,2021) En esta tabla se resumen los parámetros relevantes de la cama anódica Mariangola.

5.4.1.1 Cálculo para determinar el número mínimo de ánodos tipo “MMO” requeridos (N). La cantidad mínima de ánodos a instalar se calcula de acuerdo con el cociente entre la corriente requerida (I_R) y la corriente máxima drenada por cada ánodo (I_A), tal como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$N = \frac{I_R}{I_A}$$

$I_R = 2A$ (*Amperios*), Es la corriente suministrada por el rectificador DC

$I_A = 11A$ (*Amperios*), Es la corriente de drenado de un ánodo MMO

Al sustituir los valores de corriente requerida y corriente drenada por cada ánodo, en la ecuación de cálculo, se tiene:

$$N = \frac{2A}{11A} \rightarrow N = 0,1818 \text{ Ánodos}$$

De acuerdo con el cálculo anterior, para satisfacer el drenaje de corriente de protección catódica, se requiere la instalación de 1 ánodo tipo Metal Mixed Oxide (MMO); no obstante, es bien conocido, que, al incrementar el número de ánodos, la resistencia a tierra de la cama anódica disminuirá, lo cual es favorable para la operación del sistema; por otra parte, al incrementar el número de ánodos, la cama anódica tendrá mayor capacidad de corriente. Teniendo en cuenta lo anterior se concluye que cama anódica compuesta por siete (7) ánodos MMO de 1 x 39,4”, que inicialmente estaba diseñada para un requerimiento de corriente de 5A, satisface el requerimiento mínimo de corriente del sistema del nuevo diseño que es de 2ª

5.4.1.2 Resistencia de la cama anódica lecho continuo horizontal (R_H). El cálculo de la resistencia eléctrica de una cama anódica (lecho continuo en posición horizontal) se determina de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_H = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{d} \right) + \ln \left(\frac{L}{h} \right) - 2 + \frac{2h}{L} \right]$$

Donde:

R_H : Resistencia de cama anódica en posición horizontal (Ω)

ρ : Resistividad del suelo ($\Omega \cdot \text{cm}$)

L : Longitud del dispersor (cm)

d : Diámetro del dispersor (cm)

h : profundidad al centro del dispersor (cm)

Datos para el cálculo de la resistencia de la cama anódica horizontal (R_H):

$$\rho = 10556 \, \Omega \cdot \text{cm}$$

$$L = 1500 \, \text{cm}$$

$$d = 40 \, \text{cm}$$

$$h = 200 \, \text{cm}$$

Al sustituir los datos anteriores en la ecuación se tiene:

$$R_H = \frac{10556 \, \Omega \cdot \text{cm}}{2 * \pi * 1500 \, \text{cm}} \left[\ln \left(\frac{4 * 1500 \, \text{cm}}{40 \, \text{cm}} \right) + \ln \left(\frac{1500 \, \text{cm}}{200 \, \text{cm}} \right) - 2 + \frac{2 * 200 \, \text{cm}}{1500 \, \text{cm}} \right]$$

$$R_H = 5,9274 \, \Omega$$

5.4.1.3 Resistencia eléctrica del cable negativo (R_{CN}). La resistencia eléctrica del cable del circuito negativo se calcula a partir del producto de la resistencia eléctrica lineal del conductor (en este caso el utilizado es calibre N°8 AWG) y la longitud total del cable desde la tubería hasta el rectificador. Para realizar el cálculo de la resistencia eléctrica del cable se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_{CN} = R_L * L_C$$

Donde:

R_{CN} : Resistencia eléctrica del cable negativo (Ω)

R_L : Resistencia eléctrica lineal del conductor, para el cable AWG N° 2

L_C : Longitud del cable negativo

Datos

$$R_L = 0,512664 \frac{\Omega}{Km}$$

$$L_C = 100 \text{ m}$$

Al sustituir los datos anteriores en la ecuación se tiene:

$$R_{CN} = 0,512664 \frac{\Omega}{Km} * 0.1 Km$$

$$R_{CN} = 0,0512664 \Omega$$

5.4.1.4 Resistencia eléctrica del cable positivo (RCP). La resistencia eléctrica del cable del circuito positivo se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$R_{CP} = R_{\text{Ánodos}} + R_{\text{Cable Principal}}$$

La resistencia eléctrica que conforma el circuito positivo corresponde a la resistencia de cada uno de los cables de los ánodos (cable calibre 8 AWG) que conforman la cama anódica y la resistencia del cable conductor o principal (calibre AWG No 2) que va desde el rectificador hasta caja de positivos (Junction Box).

5.4.1.5 Resistencia de los cables de los ánodos. Cada ánodo Metal Mixed Oxide (MMO) contará con veinte metros (20 m) continuos de cable AWG No 8 con recubrimiento HMWPE, los cuales serán conectados a la caja de positivo (JBP). Las conexiones de los ánodos en la caja de positivo forman una resistencia en paralelo.

A continuación, se presentan los datos requeridos para los cálculos:

R_L : Resistencia eléctrica lineal del conductor, para el cable AWG N°8 = 2,060496Ω/Km

L_{C1} : Longitud del cable del ánodo N°1 = 15 metros

L_{C2} : Longitud del cable del ánodo N°2 = 10 metros

L_{C3} : Longitud del cable del ánodo N°3 = 5 metros

L_{C4} : Longitud del cable del ánodo N°4 = 5 metros

L_{C5} : Longitud del cable del ánodo N°5 = 5 metros

L_{C6} : Longitud del cable del ánodo N°6 = 10 metros

L_{C7} : Longitud del cable del ánodo N°7 = 15 metros

$$R_{CP_1} = R_L * L_{C_1} \rightarrow R_{CP_1} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,015Km \rightarrow R_{CP_1} = 0,031\Omega$$

$$R_{CP_2} = R_L * L_{C_2} \rightarrow R_{CP_2} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,010Km \rightarrow R_{CP_2} = 0,021\Omega$$

$$R_{CP_3} = R_L * L_{C_3} \rightarrow R_{CP_3} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,005Km \rightarrow R_{CP_3} = 0,010\Omega$$

$$R_{CP_4} = R_L * L_{C_1} \rightarrow R_{CP_4} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,005Km \rightarrow R_{CP_4} = 0,010\Omega$$

$$R_{CP_5} = R_L * L_{C_1} \rightarrow R_{CP_5} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,005Km \rightarrow R_{CP_5} = 0,010\Omega$$

$$R_{CP_6} = R_L * L_{C_6} \rightarrow R_{CP_6} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,010Km \rightarrow R_{CP_6} = 0,021\Omega$$

$$R_{CP_7} = R_L * L_{C_7} \rightarrow R_{CP_7} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,015Km \rightarrow R_{CP_7} = 0,031\Omega$$

Para el cálculo de la resistencia total de los cables que conforman el circuito positivo, se determinó el valor de las resistencias en paralelo de los siete (7) ánodos, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{R_{\dot{A}nodos}} = \frac{1}{R_{CP_1}} + \frac{1}{R_{CP_2}} + \frac{1}{R_{CP_3}} + \frac{1}{R_{CP_4}} + \frac{1}{R_{CP_5}} + \frac{1}{R_{CP_6}} + \frac{1}{R_{CP_7}}$$

$$\frac{1}{R_{\dot{A}nodos}} = \frac{1}{0,031\Omega} + \frac{1}{0,021\Omega} + \frac{1}{0,010\Omega} + \frac{1}{0,010\Omega} + \frac{1}{0,010\Omega} + \frac{1}{0,021\Omega} + \frac{1}{0,031\Omega}$$

$$R_{\dot{A}nodos} = 0,00218\Omega$$

5.4.1.6 Resistencia cable conductor principal. La longitud del cable principal corresponde a la longitud desde el rectificador, hasta la caja de positivo (Junction Box). A continuación, se presentan los datos requeridos y resultado del cálculo:

R_L : Resistencia eléctrica lineal del conductor, para el cable AWG N°2 = $0,512664 \frac{\Omega}{Km}$

L_C : Longitud del cable desde el rectificador hasta la caja de positivo = 100m

$$R_{Cable\ Principal} = R_L * L_C \rightarrow R_{Cable\ Principal} = 0,512664 \frac{\Omega}{Km} * 0,1Km$$

$$R_{Cable\ Principal} = 0,0512\Omega$$

5.4.1.7 Resistencia total circuito positivo (RCP). La resistencia total del circuito positivo es la sumatoria de la resistencia total de los cables AWG No 8 de los ánodos MMO 1" x 60" y el cable principal AWG No 2 de la Junction Box hasta el rectificador de corriente:

De acuerdo con lo anterior, la resistencia total de los cables del circuito positivo tiene un valor de:

$$R_{CP} = R_{\acute{A}nodos} + R_{Cable\ Principal} \rightarrow R_{CP} = 0,00218\Omega + 0,0512\Omega$$

$$R_{CP} = 0,05338\Omega$$

5.4.1.8 Resistencia eléctrica del cátodo (RC). La resistencia eléctrica lineal del cátodo se calcula a partir del producto de la resistencia eléctrica característica (la cual depende del espesor de pared y diámetro de la línea) y la longitud total de la tubería, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_C = R_L * L_T$$

Donde:

R_C : Resistencia eléctrica lineal de la tubería (Ω)

R_L : Resistencia eléctrica lineal característica de la tubería 8" (valor adoptado del Manual

NACE CP-4, página 7:9) = $2,46e^{-05} \frac{\Omega}{m}$.

L_T : Longitud del gasoducto Bosconia - Valledupar + Longitud del gasoducto Valledupar

- La Paz (m) = 96000m + 11200m = 107200m

$$R_C = 2,46e^{-05} \frac{\Omega}{m} * 107200m \rightarrow R_C = 2,6586\Omega$$

5.4.1.9 Resistencia eléctrica total del circuito (R_{Total}). La resistencia eléctrica total del circuito de protección catódica corresponde a la sumatoria de todas las resistencias eléctricas calculadas anteriormente, las cuales se encuentran en un circuito en serie. Para el cálculo se empleó la siguiente expresión:

$$R_{Total} = R_H + R_{CN} + R_{CP} + R_C$$

Donde:

R_H : Resistencia de la cama anódica de lecho horizontal = 5,9128 Ω .

R_{CN} : Resistencia del cable negativo = 0,05126 Ω

R_{CP} : Resistencia del cable positivo = 0,05338 Ω

R_C : Resistencia del cátodo = 2,6586 Ω

Al sustituir los valores de cada una de las resistencias en serie que conforman el circuito se tiene:

$$R_{Total} = 5,9274\Omega + 0,05123 + 0,05338\Omega + 2,6586\Omega$$

$$R_{Total} = 8,6906\Omega$$

5.4.1.10 Dimensionamiento del rectificador. El rectificador a instalar se dimensionó a partir de la corriente y voltaje DC de salida: La corriente mínima de salida debe ser mayor o igual a la corriente, cuya magnitud es de 2A DC.

Para el cálculo del voltaje DC mínimo, se emplea la Ley de Ohm y la adición de un voltaje de 2 V DC, correspondiente al voltaje contra-electromotriz que se presenta en el circuito DC de los sistemas de protección catódica por corriente impresa, tal como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$V_{DC} = (I_R * R_{Total}) + 2$$

Donde:

V_{DC} : Voltaje de salida mínimo en el rectificador (V DC).

I_R : Corriente DC requerido.

R_{Total} : Resistencia total del circuito de protección catódica.

Datos:

$$I_R = 2A \text{ DC}$$

$$R_{Total} = 8.6906\Omega \rightarrow \Omega = \frac{V}{A}$$

Al sustituir los valores se tiene:

$$V_{DC} = \left(2A * 8,6906 \frac{V}{A} \right) + 2V$$

$$V_{DC} = 19,3812V$$

5.4.1.11 Cantidad de coque requerido. La cantidad de coque requerido para el llenado de la cama anódica se determina a partir de la densidad del coque calcinado de petróleo (Loresco SC3) y el volumen de la zona que ocupa el lecho anódico continuo, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{m}{V} \rightarrow m = \delta * V$$

Donde:

δ : Densidad del coque calcinado de petróleo $\left(\frac{Kg}{m^3} \right)$

m : Cantidad de coque requerido para el llenado de la cama anódica (Kg)

V : Volumen de la cama anódica (m³), el cual se determina de acuerdo con la siguiente

ecuación:

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * L$$

Donde:

D : Diámetro de la cama anódica (m)

L : Longitud de la cama anódica (m)

Unificando las dos (2) anteriores ecuaciones se tienen:

$$m = \delta * \left(\frac{\pi}{4} * D^2 * L \right)$$

Datos:

$$\delta = 1185,12 \frac{Kg}{m^3}$$

$$D = 0,4m$$

$$L = 15m$$

Al sustituir los datos en la ecuación tenemos:

$$m = 1185,12 \frac{Kg}{m^3} * \left[\frac{\pi}{4} * (0,4m)^2 * 15m \right]$$

$$m = 2233,898Kg$$

Para la instalación del coque de la cama anódica diseñada, se recomienda la compra de 2300 Kg de coque, el cual corresponde a aproximadamente 102 bolsas (bolsas de 22,7 Kg) de coque Loresco SC3.

5.4.1.12 Cálculo de la remotividad de la cama anódica lecho continuo horizontal.

Para que exista una adecuada distribución de la corriente de protección catódica y disminuir la susceptibilidad de generar interferencias eléctricas sobre estructuras ajenas, cercanas a la cama anódica convencional Horizontal, debe garantizarse remotividad de la cama anódica con respecto a las estructuras metálicas adyacentes. NACE sugiere (“Manual NACE del Curso Especialista en Protección Catódica – CP4. 2009. Página 6:44”), que las estructuras deben encontrarse por fuera del 95% del gradiente total generado por la cama anódica, lo cual es equivalente a decir que es aceptable un 5% del gradiente de la cama anódica sobre las estructuras metálicas.

El concepto de remotividad en las camas anódicas horizontales supone que, a mayor profundidad horizontal en superficie entre el punto de instalación de la cama anódica y las tuberías, disminuye el gradiente de la cama anódica sobre las estructuras que se ubican en superficie; por otra parte, la profundidad de enterramiento del lecho continuo también tiene una leve influencia en el cálculo de la remotividad: a mayor profundidad, disminuye el gradiente de voltaje sobre las estructuras.

La siguiente ecuación se emplea para el cálculo del porcentaje (%) de gradiente sobre las estructuras como consecuencia de la descarga de corriente desde una cama anódica horizontal:

$$\%G = \frac{Ln \left[\frac{L + \sqrt{L^2 + X^2}}{X} \right]}{Ln \left[\frac{4L}{d} \right] + Ln \left[\frac{L}{h} \right] - 2 + \frac{2h}{L}} * 100$$

Donde:

L : Longitud de la cama anódica horizontal (m)

D : Diámetro del lecho continuo (m)

X : Profundidad desde el centro de la cama anódica horizontal hasta la tubería sometida al gradiente de voltaje (m)

h : Profundidad de enterramiento de la cama anódica (medido desde el nivel del suelo hasta el eje central del lecho continuo)

Datos:

$$L = 15m$$

$$D = 0,4m$$

$$X = 100m$$

$$h = 2m$$

Al sustituir los anteriores valores en la ecuación de cálculo se tiene:

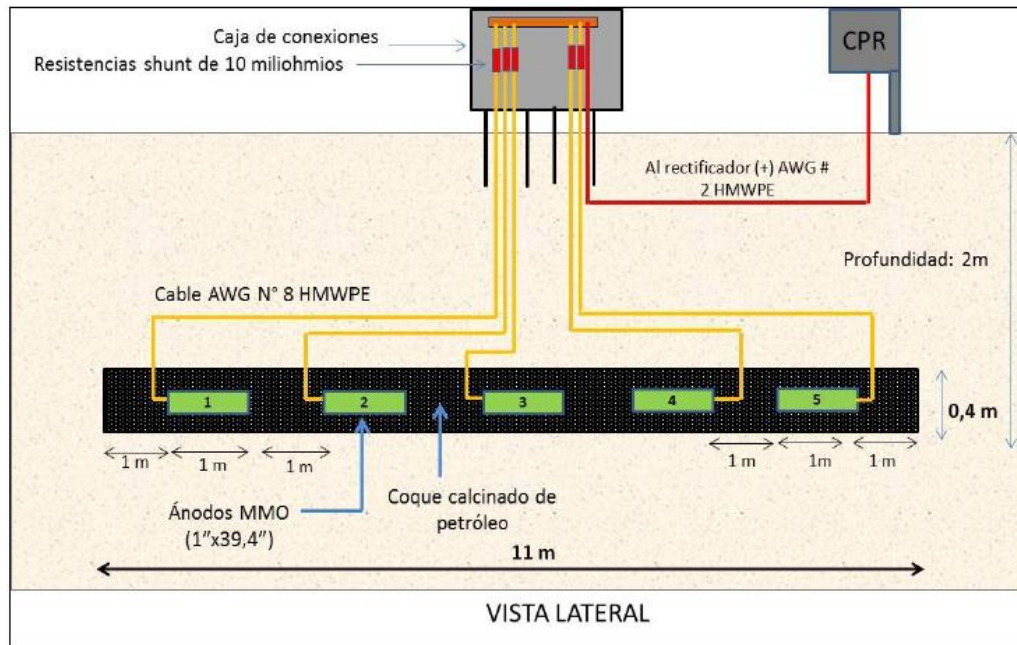
$$\%G = \frac{Ln \left[\frac{15m + \sqrt{(15m)^2 + (100m)^2}}{100m} \right]}{Ln \left[\frac{4 * 15m}{0,4m} \right] + Ln \left[\frac{15m}{2m} \right] - 2 + \frac{2 * 2m}{15m}} * 100$$

$$\%G = 2,8238\%$$

El valor de gradiente obtenido, en la ubicación de cama anódica horizontal Mariangola, a una profundidad de 2 metros y una distancia mínima de 100 metros con respecto a estructuras metálicas, garantiza un gradiente inferior al 5% en las estructuras, el cual no generará fenómenos de interferencias eléctricas.

5.4.2 Cama anódica válvula Algarrobo

La cama anódica está conformada por cinco (5) ánodos MMO de 1" x 39,4", con separación inter-anódica de 1 metro (entre el extremo de un ánodo y el inicio del siguiente ánodo) y una profundidad de 2 metros. Los ánodos están con relleno de coque calcinado de petróleo de 14 m de longitud y 40 cm de diámetro, Cada ánodo tiene un cable calibre 8 AWG recubierto con aislamiento tipo HMWPE, conectado a la caja de conexiones de positivos (JBP), esta se representa en la figura 12.

Figura 12*Ilustración cama anódica Algarrobo*

Nota: Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.

Tabla 20*Parámetros de la cama anódica instalada en Algarrobo*

RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE LA CAMA ANÓDICA HORIZONTAL VÁLVULA ALGARROBO	
CORRIENTE REQUERIDA	7 amperios
CANTIDAD DE ÁNODOS MMO INSTALADOS	5 ánodos
LONGITUD TOTAL DE LA CAMA ANÓDICA (L)	11 metros
RESISTENCIA DE LA CAMA ANÓDICA (R_A)	1.08 ohmios
RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL CABLE NEGATIVO (R_{CN})	0.051 ohmios
RESISTENCIAS ELÉCTRICA DEL CABLE POSITIVO (R_{CP})	0.0551 ohmios
RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LAS TUBERÍAS	6.54 ohmios
RESISTENCIA TOTAL DEL CIRCUITO	7.72 ohmios
CORRIENTE DE SALIDA DEL RECTIFICADOR INSTALADO	10 amperios
VOLTAJE DE SALIDA DEL RECTIFICADOR INSTALADO	60 voltios

TOTALIDAD DE COQUE DEL LECHO CONTINUO	1700 kilogramos
% GRADIENTE SOBRE LA TUBERÍA	2.30%

Nota: (Autor,2021) En esta tabla se resumen los parámetros relevantes de la cama anódica Algarrobo.

5.4.2.1 Cálculo para determinar el número mínimo de ánodos tipo “MMO” requeridos (N). La cantidad mínima de ánodos a instalar se calcula de acuerdo con el cociente entre la corriente requerida (I_R) y la corriente máxima drenada por cada ánodo (I_A), tal como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$N = \frac{I_R}{I_A}$$

Datos para el cálculo del número de ánodos (N):

$I_R = 3A$ (*Amperios*), Es la corriente suministrada por el rectificador DC

$I_A = 11A$ (*Amperios*), Es la corriente de drenado de un ánodo MMO

Al sustituir los valores de corriente requerida y corriente drenada por cada ánodo, en la ecuación de cálculo, se tiene:

$$N = \frac{3A}{11A} \rightarrow N = 0,2727 \text{ Ánodos}$$

De acuerdo con el cálculo anterior, para satisfacer el drenaje de corriente de protección catódica, se requiere la instalación de 1 ánodo tipo Metal Mixed Oxide (MMO); no obstante, es bien conocido, que, al incrementar el número de ánodos, la resistencia a tierra de la cama anódica disminuirá, lo cual es favorable para la operación del sistema; por otra parte, al incrementar el número de ánodos, la cama anódica tendrá mayor capacidad de

corriente. Teniendo en cuenta lo anterior se concluye que cama anódica compuesta por siete (7) ánodos MMO de 1 x 39,4", está sobre dimensionada, pero cumple con el requerimiento mínimo de corriente del sistema.

5.4.2.2 Resistencia de la cama anódica lecho continuo horizontal (R_H). El cálculo de la resistencia eléctrica de una cama anódica (lecho continuo en posición horizontal) se determina de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_H = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{d} \right) + \ln \left(\frac{L}{h} \right) - 2 + \frac{2h}{L} \right]$$

Donde:

R_H : Resistencia de cama anódica en posición horizontal (Ω)

ρ : Resistividad del suelo ($\Omega.cm$)

L : Longitud del dispersor (cm)

d : Diámetro del dispersor (cm)

h : profundidad al centro del dispersor (cm)

Datos para el cálculo de la resistencia de la cama anódica horizontal (R_H):

$$\rho = 1558 \Omega.cm$$

$$L = 1100 cm$$

$$d = 40 cm$$

$$h = 200 \text{ cm}$$

Al sustituir los datos anteriores en la ecuación se tiene:

$$R_H = \frac{1558 \Omega \cdot \text{cm}}{2 * \pi * 1100 \text{ cm}} \left[\ln \left(\frac{4 * 1100 \text{ cm}}{40 \text{ cm}} \right) + \ln \left(\frac{1100 \text{ cm}}{200 \text{ cm}} \right) - 2 + \frac{2 * 200 \text{ cm}}{1100 \text{ cm}} \right]$$

$$R_H = 1,075 \Omega$$

5.4.2.3 Resistencia eléctrica del cable negativo (R_{CN}). La resistencia eléctrica del cable del circuito negativo se calcula a partir del producto de la resistencia eléctrica lineal del conductor (en este caso el utilizado es calibre N°8 AWG) y la longitud total del cable desde la tubería hasta el rectificador. Para realizar el cálculo de la resistencia eléctrica del cable se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_{CN} = R_L * L_C$$

Donde:

R_{CN} : Resistencia eléctrica del cable negativo (Ω)

R_L : Resistencia eléctrica lineal del conductor, para el cable AWG N° 2

L_C : Longitud del cable negativo

Datos

$$R_L = 0,512664 \frac{\Omega}{Km}$$

$$L_C = 100 \text{ m}$$

Al sustituir los datos anteriores en la ecuación se tiene:

$$R_{CN} = 0,512664 \frac{\Omega}{Km} * 0.1 Km$$

$$R_{CN} = 0,0512664 \Omega$$

5.4.2.4 Resistencia eléctrica del cable positivo (R_{CP}). La resistencia eléctrica del cable del circuito positivo se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$R_{CP} = R_{\text{Ánodos}} + R_{\text{Cable Principal}}$$

La resistencia eléctrica que conforma el circuito positivo corresponde a la resistencia de cada uno de los cables de los ánodos (cable calibre 8 AWG) que conforman la cama anódica y la resistencia del cable conductor o principal (calibre AWG No 2) que va desde el rectificador hasta caja de positivos (Junction Box).

5.4.2.5 Resistencia de los cables de los ánodos. Cada ánodo Metal Mixed Oxide (MMO) contará con veinte metros (20 m) continuos de cable AWG No 8 con recubrimiento HMWPE, los cuales serán conectados a la caja de positivo (JBP). Las conexiones de los ánodos en la caja de positivo forman una resistencia en paralelo.

A continuación, se presentan los datos requeridos para los cálculos:

$$R_L: \text{Resistencia eléctrica lineal del conductor, para el cable AWG N°8} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km}$$

$$L_{C_1}: \text{Longitud del cable del ánodo N°1} = 15 \text{ metros}$$

$$L_{C_2}: \text{Longitud del cable del ánodo N°2} = 10 \text{ metros}$$

L_{C_3} : Longitud del cable del ánodo N°3 = 5 metros

L_{C_4} : Longitud del cable del ánodo N°4 = 10 metros

L_{C_5} : Longitud del cable del ánodo N°5 = 15 metros

$$R_{CP_1} = R_L * L_{C_1} \rightarrow R_{CP_1} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,015Km \rightarrow R_{CP_1} = 0,031\Omega$$

$$R_{CP_2} = R_L * L_{C_2} \rightarrow R_{CP_2} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,010Km \rightarrow R_{CP_2} = 0,021\Omega$$

$$R_{CP_3} = R_L * L_{C_3} \rightarrow R_{CP_3} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,005Km \rightarrow R_{CP_3} = 0,010\Omega$$

$$R_{CP_4} = R_L * L_{C_4} \rightarrow R_{CP_4} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,0010Km \rightarrow R_{CP_4} = 0,031\Omega$$

$$R_{CP_5} = R_L * L_{C_5} \rightarrow R_{CP_5} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,0015Km \rightarrow R_{CP_5} = 0,031\Omega$$

Para el cálculo de la resistencia total de los cables que conforman el circuito positivo, se determinó el valor de las resistencias en paralelo de los siete (5) ánodos, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{R_{\text{Ánodos}}} = \frac{1}{R_{CP_1}} + \frac{1}{R_{CP_2}} + \frac{1}{R_{CP_3}} + \frac{1}{R_{CP_4}} + \frac{1}{R_{CP_5}}$$

$$\frac{1}{R_{\text{Ánodos}}} = \frac{1}{0,031\Omega} + \frac{1}{0,021\Omega} + \frac{1}{0,010\Omega} + \frac{1}{0,021\Omega} + \frac{1}{0,031\Omega}$$

$$R_{\text{Ánodos}} = 0,0039\Omega$$

5.4.2.6 Resistencia cable conductor principal. La longitud del cable principal corresponde a la longitud desde el rectificador, hasta la caja de positivo (Junction Box). A continuación, se presentan los datos requeridos y resultado del cálculo:

$$R_L: \text{Resistencia eléctrica lineal del conductor, para el cable AWG N}^\circ 2 = 0,512664 \frac{\Omega}{Km}$$

$$L_C: \text{Longitud del cable desde el rectificador hasta la caja de positivo} = 100m$$

$$R_{\text{Cable Principal}} = R_L * L_C \rightarrow R_{\text{Cable Principal}} = 0,512664 \frac{\Omega}{Km} * 0,1Km$$

$$R_{\text{Cable Principal}} = 0,0512\Omega$$

5.4.2.7 Resistencia total circuito positivo (R_{CP}). La resistencia total del circuito positivo es la sumatoria de la resistencia total de los cables AWG No 8 de los ánodos MMO 1" x 60" y el cable principal AWG No 2 de la Junction Box hasta el rectificador de corriente: De acuerdo con lo anterior, la resistencia total de los cables del circuito positivo tiene un valor de:

$$R_{CP} = R_{\text{Ánodos}} + R_{\text{Cable Principal}} \rightarrow R_{CP} = 0,0039\Omega + 0,0512\Omega$$

$$R_{CP} = 0,0551\Omega$$

5.4.2.8 Resistencia eléctrica del cátodo (R_C). La resistencia eléctrica lineal del cátodo se calcula a partir del producto de la resistencia eléctrica característica (la cual depende del espesor de pared y diámetro de la línea) y la longitud total de la tubería, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_C = R_L * L_T$$

Donde:

R_C : Resistencia eléctrica lineal de la tubería (Ω)

R_L : Resistencia eléctrica lineal característica de la tubería 8" (valor adoptado del Manual

NACE CP-4, página 7:9) = $2,46e^{-05} \frac{\Omega}{m}$.

L_T : Longitud del gasoducto Bosconia – Tucurínca (m) = 94000m

$$R_C = 2,46e^{-05} \frac{\Omega}{m} * 94000m \rightarrow R_C = 2,3312\Omega$$

5.4.2.9 Resistencia eléctrica total del circuito (R_{Total}). La resistencia eléctrica total del circuito de protección catódica corresponde a la sumatoria de todas las resistencias eléctricas calculadas anteriormente, las cuales se encuentran en un circuito en serie. Para el cálculo se empleó la siguiente expresión:

$$R_{Total} = R_H + R_{CN} + R_{CP} + R_C$$

Donde:

R_H : Resistencia de la cama anódica de lecho horizontal = 1.075Ω .

R_{CN} : Resistencia del cable negativo = $0,05126 \Omega$

R_{CP} : Resistencia del cable positivo = $0,0551\Omega$

R_C : Resistencia del cátodo = $2,3312\Omega$

Al sustituir los valores de cada una de las resistencias en serie que conforman el circuito se tiene:

$$R_{Total} = 1.075\Omega + 0,05123 + 0,0551\Omega + 2,3312\Omega$$

$$R_{Total} = 3,5126\Omega$$

5.4.2.10 Dimensionamiento del rectificador. El rectificador a instalar se dimensionó a partir de la corriente y voltaje DC de salida: La corriente mínima de salida debe ser mayor o igual a la corriente, cuya magnitud es de 3A DC.

Para el cálculo del voltaje DC mínimo, se emplea la Ley de Ohm y la adición de un voltaje de 2 V DC, correspondiente al voltaje contra-electromotriz que se presenta en el circuito DC de los sistemas de protección catódica por corriente impresa, tal como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$V_{DC} = (I_R * R_{Total}) + 2$$

Donde:

V_{DC} : Voltaje de salida mínimo en el rectificador (V DC).

I_R : Corriente DC requerido.

R_{Total} : Resistencia total del circuito de protección catódica.

Datos:

$$I_R = 3A \text{ DC}$$

$$R_{Total} = 3,5126\Omega \rightarrow \Omega = \frac{V}{A}$$

Al sustituir los valores se tiene:

$$V_{DC} = \left(3A * 3,5126 \frac{V}{A} \right) + 2V$$

$$V_{DC} = 12,5377$$

5.4.2.11 Cantidad de coque requerido. La cantidad de coque requerido para el llenado de la cama anódica se determina a partir de la densidad del coque calcinado de petróleo (Loresco SC3) y el volumen de la zona que ocupa el lecho anódico continuo, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{m}{V} \rightarrow m = \delta * V$$

Donde:

δ : Densidad del coque calcinado de petróleo $\left(\frac{Kg}{m^3} \right)$

m : Cantidad de coque requerido para el llenado de la cama anódica (Kg)

V : Volumen de la cama anódica (m³), el cual se determina de acuerdo con la siguiente

ecuación:

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * L$$

Donde:

D : Diámetro de la cama anódica (m)

L : Longitud de la cama anódica (m)

Unificando las dos (2) anteriores ecuaciones se tienen:

$$m = \delta * \left(\frac{\pi}{4} * D^2 * L \right)$$

Datos:

$$\delta = 1185,12 \frac{Kg}{m^3}$$

$$D = 0,4m$$

$$L = 11m$$

Al sustituir los datos en la ecuación tenemos:

$$m = 1185,12 \frac{Kg}{m^3} * \left[\frac{\pi}{4} * (0,4m)^2 * 11m \right]$$

$$m = 1638,19Kg$$

Para la instalación del coque de la cama anódica diseñada, se recomienda la compra de 2300 Kg de coque, el cual corresponde a aproximadamente 102 bolsas (bolsas de 22,7 Kg) de coque Loresco SC3.

5.4.2.12 Cálculo de la remotividad de la cama anódica lecho continuo horizontal.

Para que exista una adecuada distribución de la corriente de protección catódica y disminuir la susceptibilidad de generar interferencias eléctricas sobre estructuras ajenas, cercanas a la cama anódica convencional Horizontal, debe garantizarse remotividad de la cama anódica con respecto a las estructuras metálicas adyacentes. NACE sugiere (“Manual NACE del Curso Especialista en Protección Catódica – CP4. 2009. Página 6:44”), que las estructuras deben encontrarse por fuera del 95% del gradiente total generado por la cama anódica, lo cual es equivalente a decir que es aceptable un 5% del gradiente de la cama anódica sobre las estructuras metálicas.

El concepto de remotividad en las camas anódicas horizontales supone que, a mayor profundidad horizontal en superficie entre el punto de instalación de la cama anódica y las tuberías, disminuye el gradiente de la cama anódica sobre las estructuras que se ubican en superficie; por otra parte, la profundidad de enterramiento del lecho continuo también tiene una leve influencia en el cálculo de la remotividad: a mayor profundidad, disminuye el gradiente de voltaje sobre las estructuras.

La siguiente ecuación se emplea para el cálculo del porcentaje (%) de gradiente sobre las estructuras como consecuencia de la descarga de corriente desde una cama anódica horizontal:

$$\%G = \frac{Ln \left[\frac{L + \sqrt{L^2 + X^2}}{X} \right]}{Ln \left[\frac{4L}{d} \right] + Ln \left[\frac{L}{h} \right] - 2 + \frac{2h}{L}} * 100$$

Donde:

L : Longitud de la cama anódica horizontal (m)

D : Diámetro del lecho continuo (m)

X : Profundidad desde el centro de la cama anódica horizontal hasta la tubería sometida al gradiente de voltaje (m)

h : Profundidad de enterramiento de la cama anódica (medido desde el nivel del suelo hasta el eje central del lecho continuo)

Datos:

$$L = 11m$$

$$D = 0,4m$$

$$X = 100m$$

$$h = 2m$$

Al sustituir los anteriores valores en la ecuación de cálculo se tiene:

$$\%G = \frac{Ln \left[\frac{11m + \sqrt{(11m)^2 + (100m)^2}}{100m} \right]}{Ln \left[\frac{4 \cdot 11m}{0,4m} \right] + Ln \left[\frac{11m}{2m} \right] - 2 + \frac{2 \cdot 2m}{11m}} * 100$$

$$\%G = 2,3\%$$

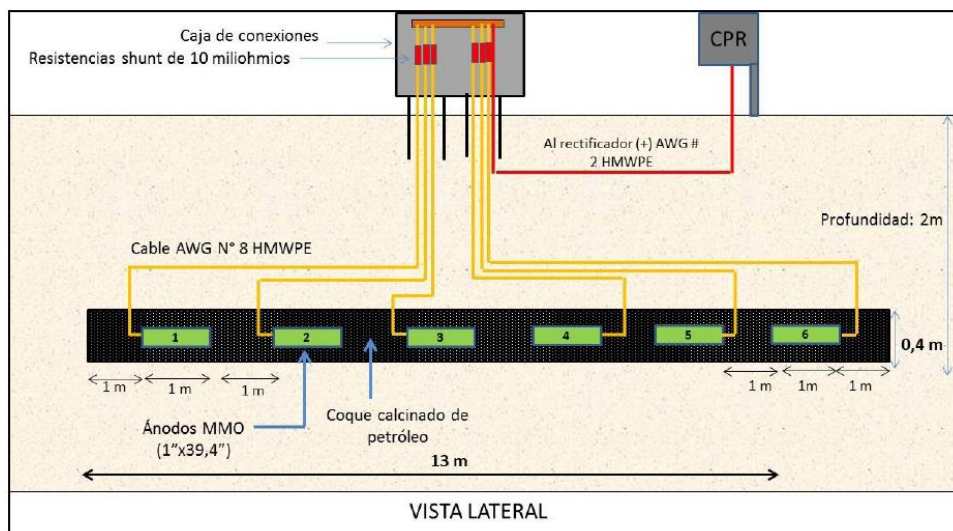
El valor de gradiente obtenido, en la ubicación de cama anódica horizontal Algarrobo a una profundidad de 2 metros y una distancia mínima de 100 metros con respecto a estructuras metálicas, garantiza un gradiente inferior al 5% en las estructuras, el cual no generará fenómenos de interferencias eléctricas.}

5.4.3 Cama Anódica válvula loma colorada

La cama o lecho anódico estará conformada por seis (6) ánodos MMO de 1" x 39,4", con separación inter-anódica de 1 metro (entre el extremo de un ánodo y el inicio del siguiente ánodo) y una profundidad de 2 metros. Los ánodos están instalados con relleno de coque calcinado de petróleo de 13 m de longitud y 40 cm de diámetro, Cada ánodo tendrá un cable calibre 8 AWG recubierto con aislamiento tipo HMWPE, con longitud suficiente para conectarlo a la caja de conexiones de positivos (JBP), esta se representa en la figura 13.

Figura 13

Ilustración cama anódica Loma Colorada



Nota: Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.

Tabla 21

Resumen de los parámetros de la cama anódica horizontal

RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE LA CAMA ANÓDICA HORIZONTAL VÁLVULA LOMA COLORADA	
CORRIENTE REQUERIDA	7 amperios
CANTIDAD DE ÁNODOS MMO INSTALADOS	6 ánodos
LONGITUD TOTAL DE LA CAMA ANÓDICA (L)	13 metros
RESISTENCIA DE LA CAMA ANÓDICA (RA)	1.60 ohmios
RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL CABLE NEGATIVO (RCN)	0.051 ohmios
RESISTENCIAS ELÉCTRICA DEL CABLE POSITIVO (RCP)	0.0541 ohmios
RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LAS TUBERÍAS	6.54 ohmios
RESISTENCIA TOTAL DEL CIRCUITO	8.24 ohmios
CORRIENTE DE SALIDA DEL RECTIFICADOR INSTALADO	10 amperios
VOLTAJE DE SALIDA DEL RECTIFICADOR INSTALADO	60 voltios
TOTALIDAD DE COQUE DEL LECHO CONTINUO	2000 kilogramos
% GRADIENTE SOBRE LA TUBERÍA	2.60%

Nota: (Autor,2021) En esta tabla se resumen los parámetros relevantes de la cama anódica Loma Colorada.

5.4.3.1 Cálculo para determinar el número mínimo de ánodos tipo “MMO” requeridos (N). La cantidad mínima de ánodos a instalar se calcula de acuerdo con el cociente entre la corriente requerida (IR) y la corriente máxima drenada por cada ánodo (IA), tal como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$N = \frac{I_R}{I_A}$$

Datos para el cálculo del número de ánodos (N):

$I_R = 3A$ (*Amperios*), Es la corriente suministrada por el rectificador DC

$I_A = 11A$ (*Amperios*), Es la corriente de drenado de un ánodo MMO

Al sustituir los valores de corriente requerida y corriente drenada por cada ánodo, en la ecuación de cálculo, se tiene:

$$N = \frac{3A}{11A} \rightarrow N = 0,2727 \text{ Ánodos}$$

De acuerdo con el cálculo anterior, para satisfacer el drenaje de corriente de protección catódica, se requiere la instalación de 1 ánodo tipo Metal Mixed Oxide (MMO); no obstante, es bien conocido, que, al incrementar el número de ánodos, la resistencia a tierra de la cama anódica disminuirá, lo cual es favorable para la operación del sistema; por otra parte, al incrementar el número de ánodos, la cama anódica tendrá mayor capacidad de corriente. Teniendo en cuenta lo anterior se concluye que cama anódica compuesta por siete (7) ánodos MMO de 1 x 39,4", está sobre dimensionada, pero cumple con el requerimiento mínimo de corriente del sistema.

5.4.3.2 Resistencia de la cama anódica lecho continuo horizontal (R_H). El cálculo de la resistencia eléctrica de una cama anódica (lecho continuo en posición horizontal) se determina de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_H = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{d} \right) + \ln \left(\frac{L}{h} \right) - 2 + \frac{2h}{L} \right]$$

Donde:

R_H : Resistencia de cama anódica en posición horizontal (Ω)

ρ : Resistividad del suelo ($\Omega.cm$)

L : Longitud del dispersor (cm)

d : Diámetro del dispersor (cm)

h : profundidad al centro del dispersor (cm)

Datos para el cálculo de la resistencia de la cama anódica horizontal (R_H):

$$\rho = 2962 \Omega .cm$$

$$L = 1300 \text{ cm}$$

$$d = 40 \text{ cm}$$

$$h = 200 \text{ cm}$$

Al sustituir los datos anteriores en la ecuación se tiene:

$$R_H = \frac{2962 \Omega .cm}{2 * \pi * 1300 \text{ cm}} \left[\ln \left(\frac{4 * 1300 \text{ cm}}{40 \text{ cm}} \right) + \ln \left(\frac{1300 \text{ cm}}{200 \text{ cm}} \right) - 2 + \frac{2 * 200 \text{ cm}}{1300 \text{ cm}} \right]$$

$$R_H = 2,0437 \Omega$$

5.4.3.3 Resistencia eléctrica del cable negativo (R_{CN}). La resistencia eléctrica del cable del circuito negativo se calcula a partir del producto de la resistencia eléctrica lineal del conductor (en este caso el utilizado es calibre N°8 AWG) y la longitud total del cable desde la tubería hasta el rectificador. Para realizar el cálculo de la resistencia eléctrica del cable se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_{CN} = R_L * L_C$$

Donde:

R_{CN} : Resistencia eléctrica del cable negativo (Ω)

R_L : Resistencia eléctrica lineal del conductor, para el cable AWG N° 2

L_C : Longitud del cable negativo

Datos

$$R_L = 0,512664 \frac{\Omega}{Km}$$

$$L_C = 100 \text{ m}$$

Al sustituir los datos anteriores en la ecuación se tiene:

$$R_{CN} = 0,512664 \frac{\Omega}{Km} * 0.1 Km$$

$$R_{CN} = 0,0512664 \Omega$$

5.4.3.4 Resistencia eléctrica del cable positivo (R_{CP}). La resistencia eléctrica del cable del circuito positivo se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$R_{CP} = R_{\text{Ánodos}} + R_{\text{Cable Principal}}$$

La resistencia eléctrica que conforma el circuito positivo corresponde a la resistencia de cada uno de los cables de los ánodos (cable calibre 8 AWG) que conforman la cama anódica y la resistencia del cable conductor o principal (calibre AWG No 2) que va desde el rectificador hasta caja de positivos (Junction Box).

5.4.3.5 Resistencia de los cables de los ánodos. Cada ánodo Metal Mixed Oxide (MMO) contará con veinte metros (20 m) continuos de cable AWG No 8 con recubrimiento HMWPE, los cuales serán conectados a la caja de positivo (JBP). Las conexiones de los ánodos en la caja de positivo forman una resistencia en paralelo.

A continuación, se presentan los datos requeridos para los cálculos:

R_L : Resistencia eléctrica lineal del conductor, para el cable AWG N°8 = $2,060496 \frac{\Omega}{Km}$

L_{C_1} : Longitud del cable del ánodo N°1 = 15 metros

L_{C_2} : Longitud del cable del ánodo N°2 = 10 metros

L_{C_3} : Longitud del cable del ánodo N°3 = 5 metros

L_{C_4} : Longitud del cable del ánodo N°4 = 5 metros

L_{C_5} : Longitud del cable del ánodo N°5 = 10 metros

L_{C_6} : Longitud del cable del ánodo N°6 = 10 metros

$$R_{CP_1} = R_L * L_{C_1} \rightarrow R_{CP_1} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,015Km \rightarrow R_{CP_1} = 0,031\Omega$$

$$R_{CP_2} = R_L * L_{C_2} \rightarrow R_{CP_2} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,010Km \rightarrow R_{CP_2} = 0,021\Omega$$

$$R_{CP_3} = R_L * L_{C_3} \rightarrow R_{CP_3} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,005Km \rightarrow R_{CP_3} = 0,010\Omega$$

$$R_{CP_4} = R_L * L_{C_1} \rightarrow R_{CP_4} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,005Km \rightarrow R_{CP_4} = 0,010\Omega$$

$$R_{CP_5} = R_L * L_{C_1} \rightarrow R_{CP_5} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,010Km \rightarrow R_{CP_5} = 0,021\Omega$$

$$R_{CP_6} = R_L * L_{C_6} \rightarrow R_{CP_6} = 2,060496 \frac{\Omega}{Km} * 0,015Km \rightarrow R_{CP_6} = 0,031\Omega$$

Para el cálculo de la resistencia total de los cables que conforman el circuito positivo, se determinó el valor de las resistencias en paralelo de los seis (6) ánodos, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{R_{\dot{A}nodos}} = \frac{1}{R_{CP_1}} + \frac{1}{R_{CP_2}} + \frac{1}{R_{CP_3}} + \frac{1}{R_{CP_4}} + \frac{1}{R_{CP_5}} + \frac{1}{R_{CP_6}}$$

$$\frac{1}{R_{\dot{A}nodos}} = \frac{1}{0,031\Omega} + \frac{1}{0,021\Omega} + \frac{1}{0,010\Omega} + \frac{1}{0,010\Omega} + \frac{1}{0,021\Omega} + \frac{1}{0,031\Omega}$$

$$R_{\dot{A}nodos} = 0,0028\Omega$$

5.4.3.6 Resistencia cable conductor principal. La longitud del cable principal corresponde a la longitud desde el rectificador, hasta la caja de positivo (Junction Box). A continuación, se presentan los datos requeridos y resultado del cálculo:

R_L : Resistencia eléctrica lineal del conductor, para el cable AWG N°2 = $0,512664 \frac{\Omega}{Km}$

L_C : Longitud del cable desde el rectificador hasta la caja de positivo = 100m

$$R_{Cable\ Principal} = R_L * L_C \rightarrow R_{Cable\ Principal} = 0,512664 \frac{\Omega}{Km} * 0,1Km$$

$$R_{Cable\ Principal} = 0,0512\Omega$$

5.4.3.7 Resistencia total circuito positivo (R_{CP}). La resistencia total del circuito positivo es la sumatoria de la resistencia total de los cables AWG No 8 de los ánodos MMO 1" x 60" y el cable principal AWG No 2 de la Junction Box hasta el rectificador de corriente:

De acuerdo con lo anterior, la resistencia total de los cables del circuito positivo tiene un valor de:

$$R_{CP} = R_{\acute{A}nodos} + R_{Cable\ Principal} \rightarrow R_{CP} = 0,0028\Omega + 0,0512\Omega$$

$$R_{CP} = 0,0541\Omega$$

5.4.3.8 Resistencia eléctrica del cátodo (R_C). La resistencia eléctrica lineal del cátodo se calcula a partir del producto de la resistencia eléctrica característica (la cual depende del espesor de pared y diámetro de la línea) y la longitud total de la tubería, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_C = R_L * L_T$$

Donde:

R_C : Resistencia eléctrica lineal de la tubería (Ω)

R_L : Resistencia eléctrica lineal característica de la tubería 8" (valor adoptado del Manual

NACE CP-4, página 7:9) = $2,46e^{-05} \frac{\Omega}{m}$.

L_T : Longitud del gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia – Cuatro Vientos (m) = 67000m

$$R_C = 2,46e^{-05} \frac{\Omega}{m} * 67000m \rightarrow R_C = 1,6616\Omega$$

5.4.3.9 Resistencia eléctrica total del circuito (R_{Total}). La resistencia eléctrica total del circuito de protección catódica corresponde a la sumatoria de todas las resistencias eléctricas calculadas anteriormente, las cuales se encuentran en un circuito en serie. Para el cálculo se empleó la siguiente expresión:

$$R_{Total} = R_H + R_{CN} + R_{CP} + R_C$$

Donde:

R_H : Resistencia de la cama anódica de lecho horizontal = $2,0437 \Omega$.

R_{CN} : Resistencia del cable negativo = $0,05126 \Omega$

R_{CP} : Resistencia del cable positivo = $0,0541\Omega$

R_C : Resistencia del cátodo = $1,6616\Omega$

Al sustituir los valores de cada una de las resistencias en serie que conforman el circuito se tiene:

$$R_{Total} = 2,0437\Omega + 0,05123 + 0,0541\Omega + 1,6616\Omega$$

$$R_{Total} = 3,8107\Omega$$

5.4.3.10 Dimensionamiento del rectificador. El rectificador a instalar se dimensionó a partir de la corriente y voltaje DC de salida: La corriente mínima de salida debe ser mayor o igual a la corriente, cuya magnitud es de 3A DC.

Para el cálculo del voltaje DC mínimo, se emplea la Ley de Ohm y la adición de un voltaje de 2 V DC, correspondiente al voltaje contra-electromotriz que se presenta en el circuito DC de los sistemas de protección catódica por corriente impresa, tal como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$V_{DC} = (I_R * R_{Total}) + 2$$

Donde:

V_{DC} : Voltaje de salida mínimo en el rectificador (V DC).

I_R : Corriente DC requerido.

R_{Total} : Resistencia total del circuito de protección catódica.

Datos:

$$I_R = 3A \text{ DC}$$

$$R_{Total} = 3,8107\Omega \rightarrow \Omega = \frac{V}{A}$$

Al sustituir los valores se tiene:

$$V_{DC} = \left(3A * 3,8107 \frac{V}{A} \right) + 2V$$

$$V_{DC} = 13,4321V$$

5.4.3.11 Cantidad de coque requerido. La cantidad de coque requerido para el llenado de la cama anódica se determina a partir de la densidad del coque calcinado de petróleo (Loresco SC3) y el volumen de la zona que ocupa el lecho anódico continuo, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{m}{V} \rightarrow m = \delta * V$$

Donde:

δ : Densidad del coque calcinado de petróleo $\left(\frac{Kg}{m^3} \right)$

m : Cantidad de coque requerido para el llenado de la cama anódica (Kg)

V : Volumen de la cama anódica (m³), el cual se determina de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * L$$

Donde:

D : Diámetro de la cama anódica (m)

L : Longitud de la cama anódica (m)

Unificando las dos (2) anteriores ecuaciones se tienen:

$$m = \delta * \left(\frac{\pi}{4} * D^2 * L \right)$$

Datos:

$$\delta = 1185,12 \frac{Kg}{m^3}$$

$$D = 0,4m$$

$$L = 13m$$

Al sustituir los datos en la ecuación tenemos:

$$m = 1185,12 \frac{Kg}{m^3} * \left[\frac{\pi}{4} * (0,4m)^2 * 13m \right]$$

$$m = 1936,05Kg$$

Para la instalación del coque de la cama anódica diseñada, se recomienda la compra de 2300 Kg de coque, el cual corresponde a aproximadamente 102 bolsas (bolsas de 22,7 Kg) de coque Loresco SC3.

5.4.3.12 Cálculo de la remotividad de la cama anódica lecho continuo horizontal.

Para que exista una adecuada distribución de la corriente de protección catódica y disminuir la susceptibilidad de generar interferencias eléctricas sobre estructuras ajenas, cercanas a la cama anódica convencional Horizontal, debe garantizarse remotividad de la cama anódica con respecto a las estructuras metálicas adyacentes. NACE sugiere (“Manual NACE del Curso Especialista en Protección Catódica – CP4. 2009. Página 6:44”), que las estructuras deben encontrarse por fuera del 95% del gradiente total generado por la cama anódica, lo cual es equivalente a decir que es aceptable un 5% del gradiente de la cama anódica sobre las estructuras metálicas.

El concepto de remotividad en las camas anódicas horizontales supone que, a mayor profundidad horizontal en superficie entre el punto de instalación de la cama anódica y las tuberías, disminuye el gradiente de la cama anódica sobre las estructuras que se ubican en superficie; por otra parte, la profundidad de enterramiento del lecho continuo también tiene una leve influencia en el cálculo de la remotividad: a mayor profundidad, disminuye el gradiente de voltaje sobre las estructuras.

La siguiente ecuación se emplea para el cálculo del porcentaje (%) de gradiente sobre las estructuras como consecuencia de la descarga de corriente desde una cama anódica horizontal:

$$\%G = \frac{Ln \left[\frac{L + \sqrt{L^2 + X^2}}{X} \right]}{Ln \left[\frac{4L}{d} \right] + Ln \left[\frac{L}{h} \right] - 2 + \frac{2h}{L}} * 100$$

Donde:

L : Longitud de la cama anódica horizontal (m)

D : Diámetro del lecho continuo (m)

X : Profundidad desde el centro de la cama anódica horizontal hasta la tubería sometida al

gradiente de voltaje (m)

h : Profundidad de enterramiento de la cama anódica (medido desde el nivel del suelo

hasta el eje central del lecho continuo)

Datos:

$$L = 13m$$

$$D = 0,4m$$

$$X = 100m$$

$$h = 2m$$

Al sustituir los anteriores valores en la ecuación de cálculo se tiene:

$$\%G = \frac{Ln \left[\frac{13m + \sqrt{(13m)^2 + (100m)^2}}{100m} \right]}{Ln \left[\frac{4 * 13m}{0,4m} \right] + Ln \left[\frac{13m}{2m} \right] - 2 + \frac{2 * 2m}{13m}} * 100$$

$$\%G = 2,57\%$$

El valor de gradiente obtenido, en la ubicación de cama anódica horizontal Loma Colorada, a una profundidad de 2 metros y una distancia mínima de 100 metros con respecto a estructuras metálicas, garantiza un gradiente inferior al 5% en las estructuras, el cual no generará fenómenos de interferencias eléctricas.

5.5 Descripción de los Nuevos Equipos para Suplir los Rectificadores de Corriente Alterna Instalados Inicialmente

Se van a reemplazar los rectificadores AC/DC instalados inicialmente en la red de gasoductos, los cuales tenían las siguientes consideraciones:

Rectificador Mariangola: 65 V_{DC} / 5 A_{DC}.

Rectificador Algarrobo: 60 V_{DC} / 10 A_{DC}.

Rectificador Loma Colorada: 60 V_{DC} / 10 A_{DC}.

Se van a cambiar por tres equipos WT-SCPS, los cuales cumplen con los nuevos requerimientos, con los cuales se diseñaron los 3 sistemas de protección catódica:

Rectificador Mariangola: 19,3812 V_{DC} / 2 A_{DC}.

Rectificador Algarrobo: 12,5377 V_{DC} / 3 A_{DC}.

Rectificador Loma Colorada: 134321 V_{DC} / 3 A_{DC}.

El equipo XARTU/1 Cathodic Protection tiene las siguientes características:

Voltaje de entrada: 11 - 30 V_{DC}

Voltaje de salida: 2.4 - 24 V_{DC}

Corriente de salida: 0 – 80 A_{DC}

En la figura 14 se muestra una imagen de un equipo XARTU/1 – CP.

Figura 14

Imagen Equipo XARTU/1 CP (Cathodic Protection)



Nota: Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020).

Para complementar el equipo XARTU/1 CP (Cathodic Protection) se van a instalar unos equipos WILOG-CP en los extremos de cada gasoducto, con la finalidad de monitorear en tiempo real el potencial de protección catódica, este equipo tiene conexión al sistema SCADA.

En el gasoducto Bosconia – Valledupar, se van a instalar 3 equipos WILOG-CP con la siguiente distribución: el primero en la estación Bosconia, el segundo en la estación Valledupar y el tercero en la estación compresora La Paz.

En el gasoducto Bosconia – Tucurín, se van a instalar 2 equipos WILOG-CP con la siguiente distribución: el primero en la estación Bosconia y el segundo en la estación Tucurín.

En el gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia – Cuatro Vientos, se van a instalar 2 equipos WILOG-CP con la siguiente distribución: el primero en la estación Cuatro Vientos y el segundo en la estación Pueblo Nuevo, en la figura 15 se muestra una imagen de un equipo WILOG-CP.

Figura 15

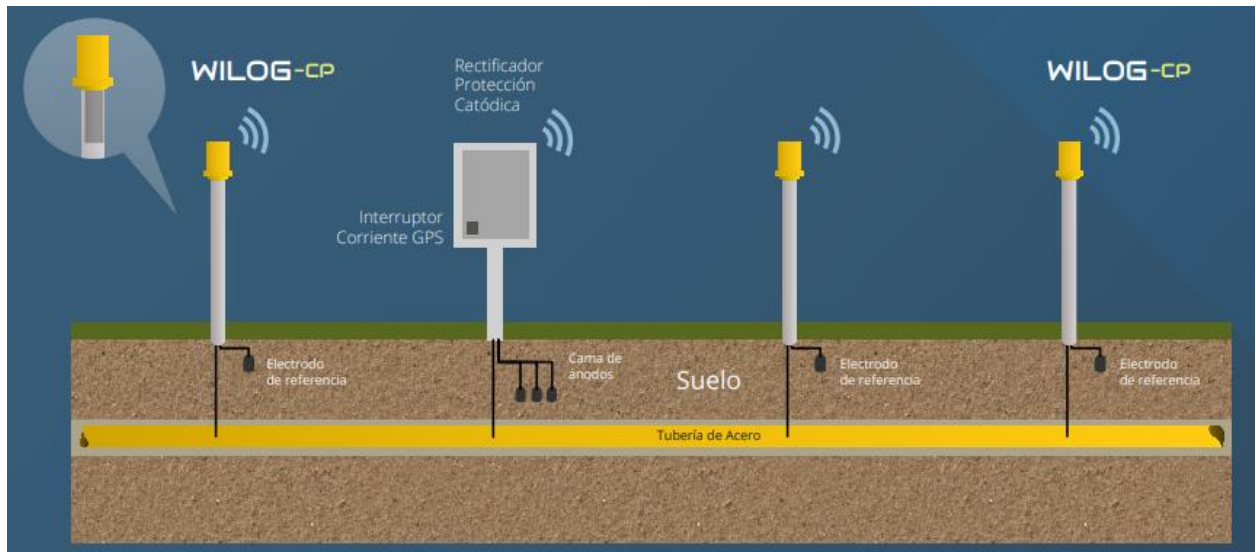
Imagen Equipo WILOG-CP (Cathodic Protection)



Nota: Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

Figura 16

Esquema de instalación equipos WILOG-CP



Nota: Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020). Esta figura muestra esquemáticamente el funcionamiento de un sistema de protección catódica monitoreado por varios equipos Wilog-CP

5.6 Cálculos de los Sistemas de Alimentación Fotovoltaicos

Para determinar el tamaño del sistema solar fotovoltaico hay que conocer el consumo diario en energía de los equipos a instalar (en Watts - horas). En la tabla 22 se relacionan los requerimientos de energía para cada sistema de protección catódica.

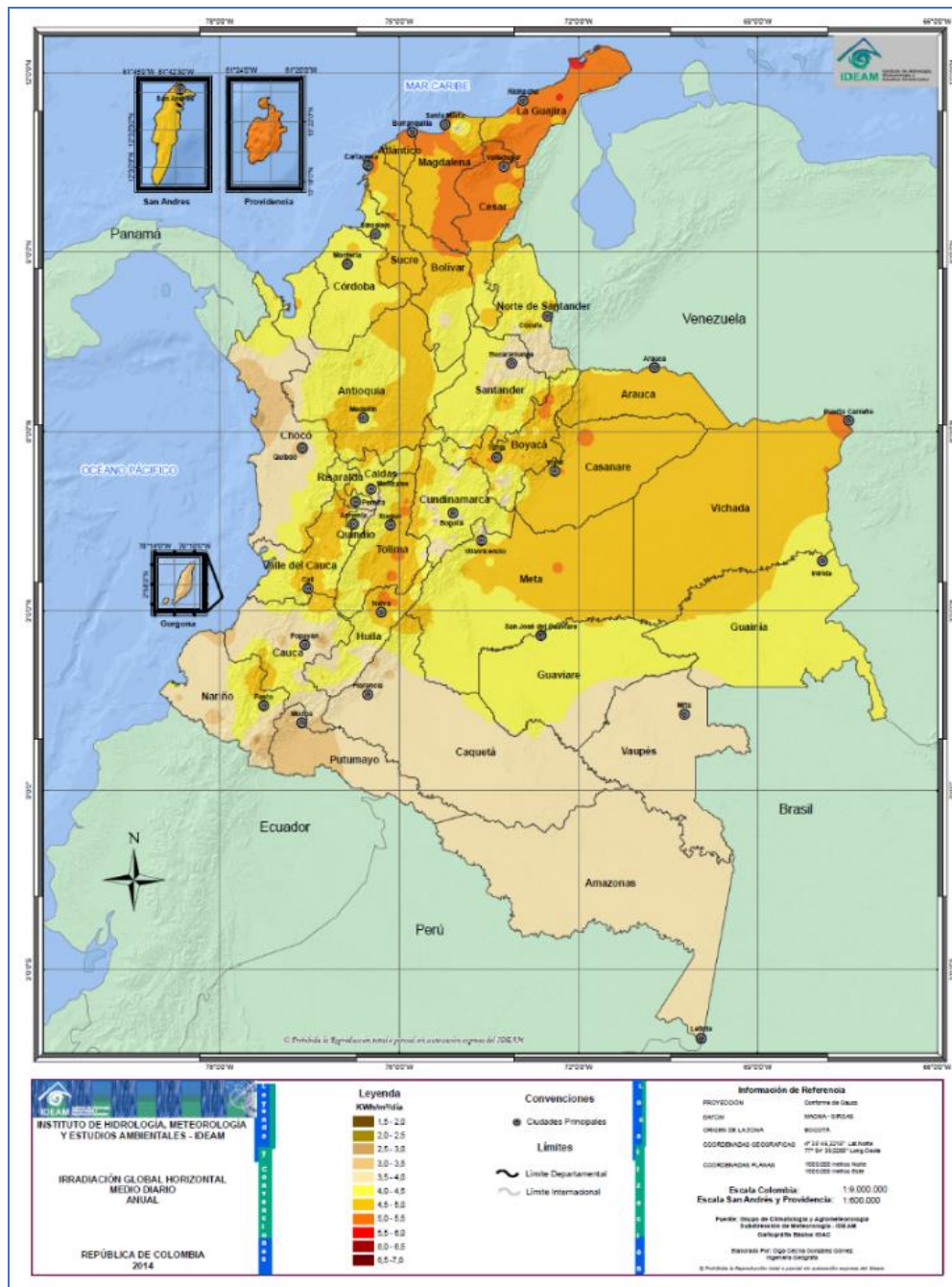
Tabla 22*Requerimiento de energía para los sistemas de protección catódica*

Descripción del sistema de protección catódica	Requerimiento de Corriente (A)	Requerimiento de Voltaje (V)	Potencia (W)	Horas de uso al día (h/día)	Consumo por carga durante un día (Wh/día)
Sistema de protección catodica Gasoducto Bosconia - Valledupar	2	19.3812	38.7624	24	930.2985
Sistema de protección catodica Gasoducto Bosconia - Tucurín	3	12.5377	37.6131	24	902.7137
Sistema de protección catodica Gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia - Cuatro Vientos	3	13.4321	40.2964	24	967.1131

Nota: (Autores,2021)

5.6.1 Cálculo de las horas solar pico disponibles en los puntos de inyección de corriente

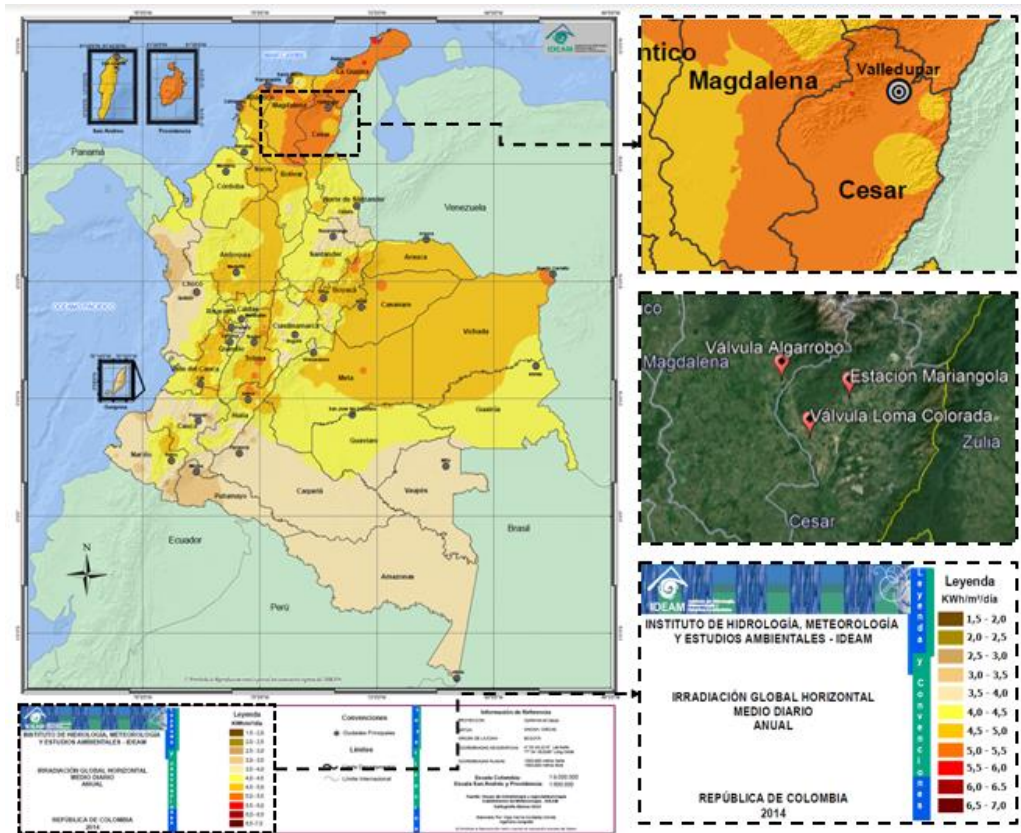
Se tomó como referencia el mapa de irradiación global horizontal medio diario anual, documento emitido por el Instituto de Hidrología, Metrología y Estudios Ambientales (IDEAM), donde se puede observar, la distribución de la irradiación solar multianual en el territorio colombiano, como se muestra en la figura 17.

Figura 17*Mapa de radiación solar en Colombia*

Nota: (Ideam,2019)

Figura 18

Ubicación de rectificadores en el Mapa de radiación solar de Colombia



Nota: (Autor,2021)

Según la localización de los 3 puntos donde se instalarán los rectificadores, tienen una irradiación solar de 5 a 5,5 Kwh/m2/día de acuerdo a la figura 18.

Para este proyecto se tomará un valor de referencia de 5,5 Kwh/m2/día.

Las horas solar pico (HSP), se definen como el número de horas en que disponemos de una irradiancia solar constante de 1000W/m2.

$$HPS = \frac{\text{Irradiancia} \left(\frac{Wh}{m^2 \text{ día}} \right)}{1000 \left(\frac{W}{m^2} \right)}$$

Reemplazando valores tenemos

$$HPS = \frac{5500 \left(\frac{Wh}{m^2 \text{ día}} \right)}{1000 \left(\frac{W}{m^2} \right)}$$

$$HPS = 5,5 \frac{h}{\text{día}}$$

5.6.2 Cálculo del sistema de alimentación fotovoltaico del sistema de protección catódica del gasoducto Bosconia Valledupar

El rectificador del sistema de protección catódica del gasoducto Bosconia – Valledupar, requiere una potencia de $930,2985 \frac{Wh}{Día}$.

5.6.2.1 Consumo de carga total corregido. Para calcular el consumo de carga total corregido, se debe adicionar un factor de pérdidas por conexiones de 10% de la potencia requerida.

$$\text{Consumo Carga Corregido} = \left[\text{Consumo Energía} \left(\frac{Wh}{Día} \right) \right] * [\text{Factor Pérdidas Conexiones}]$$

Donde:

$$\text{Consumo Energía} = 930,2985 \frac{Wh}{Día}$$

Factor pérdidas Conexiones = 10%

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Consumo Carga Corregido} = \left(930,2985 \frac{Wh}{\text{Día}} \right) * 1.1$$

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 1023,3283 \frac{Wh}{\text{Día}}$$

5.6.2.2 Capacidad del panel solar.

$$\text{Capacidad Paneles Solares} = \frac{\text{Consumo Carga Corregido}}{\text{Horas Solar Pico}}$$

Donde:

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 1023,3283 \frac{Wh}{\text{Día}}$$

$$\text{Horas Solar Pico (HSP)} = 5,5 \frac{h}{\text{Día}}$$

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Capacidad Paneles Solares} = \frac{1023,3283 \frac{Wh}{\text{Día}}}{5,5 \frac{h}{\text{Día}}}$$

$$\text{Capacidad Paneles Solares} = 186,0597 W$$

Para este sistema se van a utilizar paneles solares de 150W – 12V de potencia y baterías de 33Ah – 12V, la principal razón de escoger estos elementos es por tener disponibilidad en el inventario de la empresa, a continuación en la tabla 23, se muestran las especificaciones técnicas del panel de 150W – 12V, relevantes para el diseño:

Tabla 23*Especificaciones del panel solar*

Especificaciones del Panel Solar 150W - 12V	
Potencia Nominal (W_p)	150W
Voltaje en circuito abierto (V_{OC})	22,5V
Intensidad en corto circuito (I_{SC})	8,56A
Voltaje a máxima potencia (V_m)	18,5V
Intensidad a máxima potencia (I_m)	8,11A
Rendimiento	77.89%

Nota: Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P. (2020)

5.6.2.3 Número de paneles solares a instalar.*Número Paneles Solares*

$$= \frac{\text{Consumo Carga Corregido}}{(\text{Horas Solar Pico} * \text{Rendimiento Panel} * \text{Potencia Pico Panel})}$$

Donde:

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 1023,3283 \frac{Wh}{Día}$$

$$\text{Horas Solar Pico (HSP)} = 5,5 \frac{h}{Día}$$

$$\text{Rendimiento de Panel} = 77,89\%$$

$$\text{Potencia Pico Panel} = 150W$$

Reemplazando los valores tenemos

$$\text{Número Paneles Solares} = \frac{1023,3283 \frac{Wh}{Día}}{\left(5,5 \frac{h}{Día} * 0,7789 * 150 W\right)}$$

$$\text{Número Paneles Solares} = 1,9230 \approx 2$$

$$\text{Número Paneles Solares} = 2$$

Se define un número de 2 paneles solares de 150 W – 12V conectados en paralelo.

5.6.2.4 Capacidad del banco de baterías.

Capacidad Banco de Baterías

$$= \left[\frac{\text{Consumo Carga Corregido}}{\text{Voltaje Batería}} \right] * \text{Factor Pédida Temperatura} \\ * \text{Autonomía}$$

Donde:

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 1023,3283 \frac{\text{Wh}}{\text{Día}}$$

$$\text{Voltaje Batería} = 12\text{V}$$

$$\text{Factor Perdida por Temperatura} = 30\%$$

$$\text{Autonomía} = 2 \text{ Días}$$

Recordemos que la unidad de potencia $\text{Watts} = V * A$

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Capacidad Banco de Baterías} = \left[\frac{1023,3283 \frac{\text{VAh}}{\text{Día}}}{12\text{V}} \right] * 1.3 * 2 \text{ Día}$$

$$\text{Capacidad Banco de Baterías} = 221,7211 \text{ Ah}$$

5.6.2.5 Número de baterías.

$$\text{Número Baterías} = \frac{\text{Capacidad Banco de Baterías}}{\text{Amperaje Batería}}$$

Donde:

Capacidad Banco de Baterías = 221,7211 Ah

Amperaje Batería = 33 Ah

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Número Baterías} = \frac{221,7211 \text{ Ah}}{33 \text{ Ah}}$$

$$\text{Número Baterías} = 6,7188 \approx 7$$

Se define un número de 8 baterías 33Ah -12V

$$\text{Número Baterías} = 8$$

5.6.2.6 Capacidad del Regulador de Carga.

Capacidad Regulador

$$= \text{Corriente Máxima Panel} * \text{Factor de Seguridad}$$

$$* \text{Número Paneles Solares Paralelo}$$

Donde:

$$\text{Corriente Máxima Panel} = I_{sc} = 8,56\text{A}$$

$$\text{Factor de Seguridad} = 25\%$$

$$\text{Número Paneles Solares Paralelo} = 2$$

Reemplazando los valores, tenemos:

$$\text{Capacidad Regulador de Carga} = 8,56 \text{ A} * 1.25 * 2$$

$$\text{Capacidad Regulador de Carga} = 21,4 \text{ A}$$

Se define un regulador de carga de 30A

5.6.2.7 Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Mariangola. A continuación, se muestra la tabla 24 con los datos de los parámetros calculados para el sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Mariangola:

Tabla 24

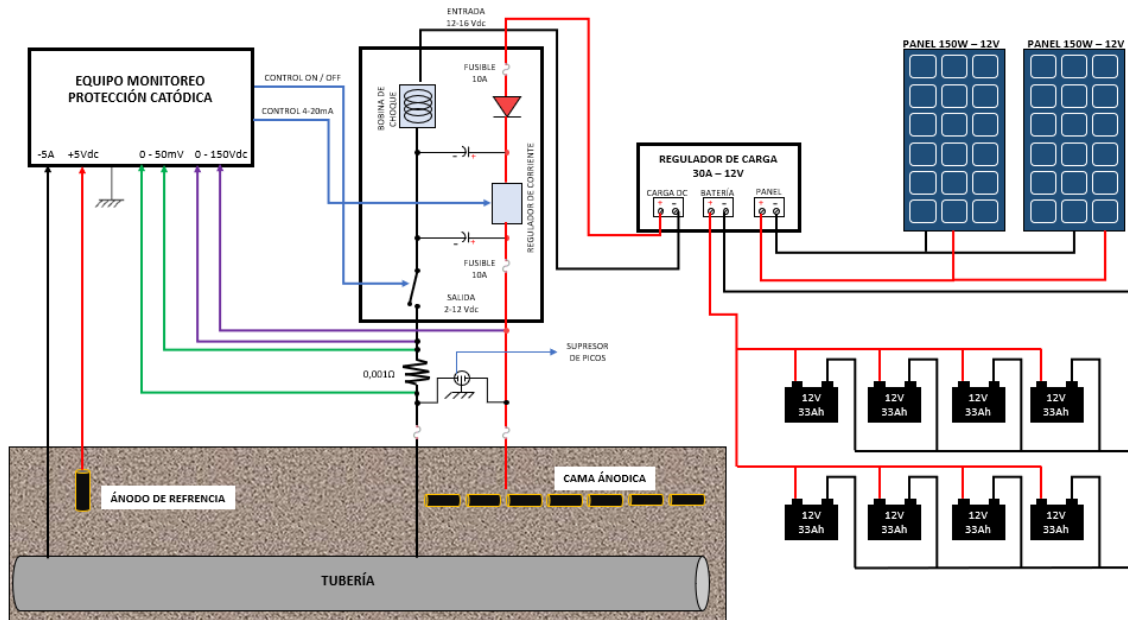
Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Mariangola

CONSUMO NOMINAL REQUERIDA POR EL SPC	930.2985 Wh/Día
CONSUMO CARGA CORREGIDO	1023.3283 Wh/Día
TENSIÓN DEL SISTEMA	12 V
CAPACIDAD PANELES SOLARES	186.0595 W
POTENCIA PANEL SOLAR SELECCIONADO	150 W
NÚMERO DE PANELES SOLARES A INSTALAR	2 (EN PARALELO)
CAPACIDAD BANCO BATERÍAS	221.7211 Ah
BATERÍAS SELECCIONADAS	33 A - 12V
NÚMERO DE BATERÍAS A INSTALAR	8 (EN PARALELO)
CAPACIDAD REGULADOR DE CARGA	21.4 A - 12 V
REGULADOR DE CARGA SELECCIONADO	30 A - 12 V

Nota: (Autor,2021)

Figura 19

Esquema del sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Valledupar



Nota: (Autor, 2021). Esta figura representa el esquema de conexiones de los elementos que conforman el sistema de protección catódica Bosconia – Valledupar.

5.6.3 Cálculo del sistema de alimentación fotovoltaico del sistema de protección catódica del gasoducto Bosconia Tucurinca

El rectificador del sistema de protección catódica del gasoducto Bosconia –Tucurinca, requiere una potencia de $902,7137 \frac{Wh}{Dia}$.

5.6.3.1 Consumo de carga total corregido. Para calcular el consumo de carga corregido se debe adicionar un factor de pérdidas por conexiones de 10% de la potencia requerida.

$$\text{Consumo Carga Corregido} = \left[\text{Consumo Energía} \left(\frac{Wh}{\text{Día}} \right) \right] * [\text{Factor Pérdidas Conexiones}]$$

Donde:

$$\text{Consumo Energía} = 902,7137 \frac{Wh}{\text{Día}}$$

Factor Pérdidas Conexiones = 10%

$$\text{Consumo Carga Corregido} = \left(902,7137 \frac{Wh}{\text{Día}} \right) * 1.1$$

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 992,9851 \frac{Wh}{\text{Día}}$$

5.6.3.2 Capacidad del panel solar.

$$\text{Capacidad Paneles Solares} = \frac{\text{Consumo Carga Corregido}}{\text{Horas Solar Pico}}$$

Donde:

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 992,9851 \frac{Wh}{\text{Día}}$$

$$\text{Horas Solar Pico (HSP)} = 5,5 \frac{h}{\text{Día}}$$

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Capacidad Paneles Solares} = \frac{992,9851 \frac{Wh}{Día}}{5,5 \frac{h}{Día}}$$

$$\text{Capacidad Paneles Solares} = 180,5427 W$$

Para este sistema se van a utilizar paneles solares de 150W – 12V de potencia y baterías de 33Ah – 12V, la principal razón de escoger estos elementos es por tener disponibilidad en el inventario de la empresa, para observar las especificaciones técnicas del panel de 150W – 12V (ver tabla 23):

5.6.3.3 Número de paneles solares a instalar.

Número Paneles Solares

$$= \frac{\text{Consumo Carga Corregido}}{(\text{Horas Solar Pico} * \text{Rendimiento Panel} * \text{Potencia Pico Panel})}$$

Donde:

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 992,9851 \frac{Wh}{Día}$$

$$\text{Horas Solar Pico (HSP)} = 5,5 \frac{h}{Día}$$

$$\text{Rendimiento de Panel} = 77,89\%$$

$$\text{Potencia Pico Panel} = 150W$$

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Número Paneles Solares} = \frac{992,9851 \frac{Wh}{\text{Día}}}{\left(5,5 \frac{h}{\text{Día}} * 0,7789 * 150 W\right)}$$

$$\text{Número Paneles Solares} = 1,5451 \approx 2$$

$$\text{Número Paneles Solares} = 2$$

Se define un número de 2 paneles solares de 150 W – 12V conectados en paralelo.

5.6.3.4 Capacidad del banco de baterías.

Capacidad Banco de Baterías

$$= \left[\frac{\text{Consumo Carga Corregido}}{\text{Voltaje Batería}} \right] * \text{Factor Pédida Temperatura} \\ * \text{Autonomía}$$

Donde:

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 992,9851 \frac{Wh}{\text{Día}}$$

$$\text{Voltaje Batería} = 12V$$

$$\text{Factor Perdida por Temperatura} = 30\%$$

$$\text{Autonomía} = 2 \text{ Días}$$

Recordemos que la unidad de potencia $Watts = V * A$

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Capacidad Banco de Baterías} = \left[\frac{992,9851 \frac{VAh}{\text{Día}}}{12V} \right] * 1.3 * 2 \text{ Día}$$

$$\text{Capacidad Banco de Baterías} = 215,1468 \text{ Ah}$$

5.6.3.5 Número de baterías.

$$\text{Número Baterías} = \frac{\text{Capacidad Banco de Baterías}}{\text{Amperaje Batería}}$$

Donde:

Capacidad Banco de Baterías = 215,1468 Ah

Amperaje Batería = 33 Ah

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Número Baterías} = \frac{215,1468 \text{ Ah}}{33 \text{ Ah}}$$

$$\text{Número Baterías} = 6,5195 \approx 7$$

Se define un número de 8 baterías 33Ah -12V

$$\text{Número Baterías} = 8$$

5.6.3.6 Capacidad del Regulador de Carga.

Capacidad Regulador

$$= \text{Corriente Máxima Panel} * \text{Factor de Seguridad}$$

$$* \text{Número Paneles Solares Palalelo}$$

Donde:

Corriente Máxima Panel = I_{SC} = 8,56A

Factor de Seguridad=25%

Número Paneles Solares Paralelo = 2

Reemplazando los valores, tenemos:

$$\text{Capacidad Regulador de Carga} = 8,56 \text{ A} * 1.25 * 2$$

$$\text{Capacidad Regulador de Carga} = 21,4 \text{ A}$$

Se define un regulador de carga de 30^a

5.6.3.7 Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Algarrobo. A continuación, se muestra la tabla 25 con los datos de los parámetros calculados para el sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Algarrobo:

Tabla 25

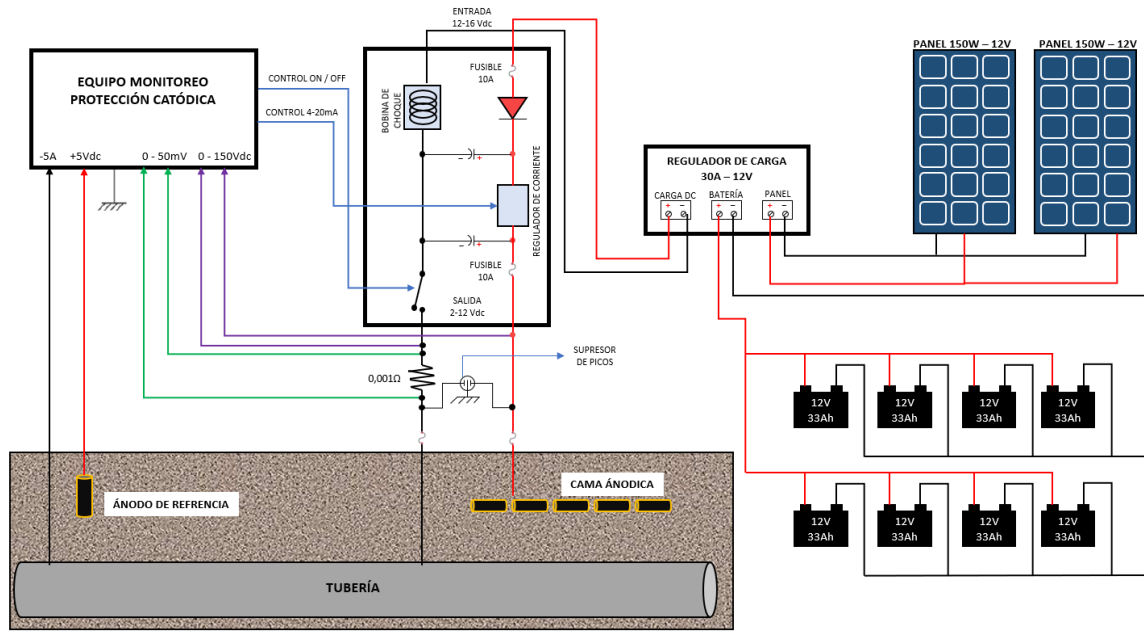
Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Algarrobo

CONSUMO NOMINAL REQUERIDA POR EL SPC	902.7137 Wh/Día
CONSUMO CARGA CORREGIDO	992.9851 Wh/Día
TENSIÓN DEL SISTEMA	12 V
CAPACIDAD PANELES SOLARES	180.5427 W
POTENCIA PANEL SOLAR SELECCIONADO	150 W
NÚMERO DE PANELES SOLARES A INSTALAR	2 (EN PARALELO)
CAPACIDAD BANCO BATERÍAS	215.1468 Ah
BATERÍAS SELECCIONADAS	2 DÍAS
NÚMERO DE BATERÍAS A INSTALAR	33 A - 12V
CAPACIDAD REGULADOR DE CARGA	8 (EN PARALELO)
REGULADOR DE CARGA SELECCIONADO	30 A - 12 V

Nota: (Autor,2021)

Figura 20

Esquema del sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Tucurinca



Nota: (Autor, 2021). Esta figura representa el esquema de conexiones de los elementos que conforman el sistema de protección catódica Bosconia – Tucurinca.

5.6.4 Cálculo del sistema de alimentación fotovoltaico del sistema de protección catódica del gasoducto Pueblo Nuevo Bosconia Cuatro Vientos

El rectificador del sistema de protección catódica del gasoducto Pueblo Nuevo -Bosconia – Cuatro Vientos, requiere una potencia de $967,1131 \frac{Wh}{Día}$.

5.6.4.1 Consumo de carga total corregido. Para calcular el consumo de carga corregido se debe adicionar un factor de pérdidas por conexiones de 10% de la potencia requerida.

$$\text{Consumo Carga Corregido} = \left[\text{Consumo Energía} \left(\frac{Wh}{\text{Día}} \right) \right] * [\text{Factor Pérdidas Conexiones}]$$

Donde:

$$\text{Consumo Energía} = 967,1131 \frac{Wh}{\text{Día}}$$

Factor Pérdidas Conexiones = 10%

$$\text{Consumo Carga Corregido} = \left(967,1131 \frac{Wh}{\text{Día}} \right) * 1.1$$

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 1063,8244 \frac{Wh}{\text{Día}}$$

5.6.4.2 Capacidad del panel solar.

$$\text{Capacidad Paneles Solares} = \frac{\text{Consumo Carga Corregido}}{\text{Horas Solar Pico}}$$

Donde:

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 1063,8244 \frac{Wh}{\text{Día}}$$

$$\text{Horas Solar Pico (HSP)} = 5,5 \frac{h}{\text{Día}}$$

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Capacidad Paneles Solares} = \frac{1063,8244 \frac{Wh}{\text{Día}}}{5,5 \frac{h}{\text{Día}}}$$

$$|\text{Capacidad Paneles Solares} = 193,4226 W$$

Para este sistema se van a utilizar paneles solares de 150W – 12V de potencia y baterías de 33Ah – 12V, la principal razón de escoger estos elementos es por tener disponibilidad en el inventario de la empresa, para observar las especificaciones técnicas del panel de 150W – 12V (ver tabla 23):

5.6.4.3 Número de paneles solares a instalar.

Número Paneles Solares

$$= \frac{\text{Consumo Carga Corregido}}{(\text{Horas Solar Pico} * \text{Rendimiento Panel} * \text{Potencia Pico Panel})}$$

Donde:

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 1063,8244 \frac{Wh}{Día}$$

$$\text{Horas Solar Pico (HSP)} = 5,5 \frac{h}{Día}$$

$$\text{Rendimiento de Panel} = 77,89\%$$

$$\text{Potencia Pico Panel} = 150W$$

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Número Paneles Solares} = \frac{1063,8244 \frac{Wh}{Día}}{\left(5,5 \frac{h}{Día} * 0,7789 * 150 W\right)}$$

$$\text{Número Paneles Solares} = 1,6531 \approx 2$$

$$\text{Número Paneles Solares} = 2$$

Se define un número de 2 paneles solares de 150 W – 12V conectados en paralelo.

5.6.4.4 Capacidad del banco de baterías.

Capacidad Banco de Baterías

$$= \left[\frac{\text{Consumo Carga Corregido}}{\text{Voltaje Batería}} \right] * \text{Factor Périda Temperatura} \\ * \text{Autonomía}$$

Donde:

$$\text{Consumo Carga Corregido} = 1063,8244 \frac{Wh}{Día}$$

$$\text{Voltaje Batería} = 12V$$

$$\text{Factor Perdida por Temperatura} = 30\%$$

$$\text{Autonomía} = 2 \text{ Días}$$

$$\text{Recordemos que la unidad de potencia } Watts = V * A$$

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Capacidad Banco de Baterías} = \left[\frac{1063,8244 \frac{VAh}{Día}}{12V} \right] * 1.3 * 2 \text{ Día}$$

$$\text{Capacidad Banco de Baterías} = 230,4953 Ah$$

5.6.4.5 Número de baterías.

$$\text{Número Baterías} = \frac{\text{Capacidad Banco de Baterías}}{\text{Amperaje Batería}}$$

Donde:

$$\text{Capacidad Banco de Baterías} = 230,4953 Ah$$

Amperaje Batería = 33 Ah

Reemplazando los valores tenemos:

$$\text{Número Baterías} = \frac{230,4953 \text{ Ah}}{33 \text{ Ah}}$$

$$\text{Número Baterías} = 6,9847 \approx 7$$

Se define un número de 8 baterías 33Ah -12V

$$\text{Número Baterías} = 8$$

5.6.4.6 Capacidad del Regulador de Carga.

Capacidad Regulador

$$= \text{Corriente Máxima Panel} * \text{Factor de Seguridad} \\ * \text{Número Paneles Solares Paralelo}$$

Donde:

Corriente Máxima Panel = I_{SC} = 8,56A

Factor de Seguridad=25%

Número Paneles Solares Paralelo = 2

Reemplazando los valores, tenemos:

$$\text{Capacidad Regulador de Carga} = 8,56 \text{ A} * 1.25 * 2$$

$$\text{Capacidad Regulador de Carga} = 21,4 \text{ A}$$

Se define un regulador de carga de 30^a

5.6.4.7 Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Loma Colorada. A continuación, se muestra la tabla 26 con los datos de los parámetros calculados para el sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Loma Colorada:

Tabla 26

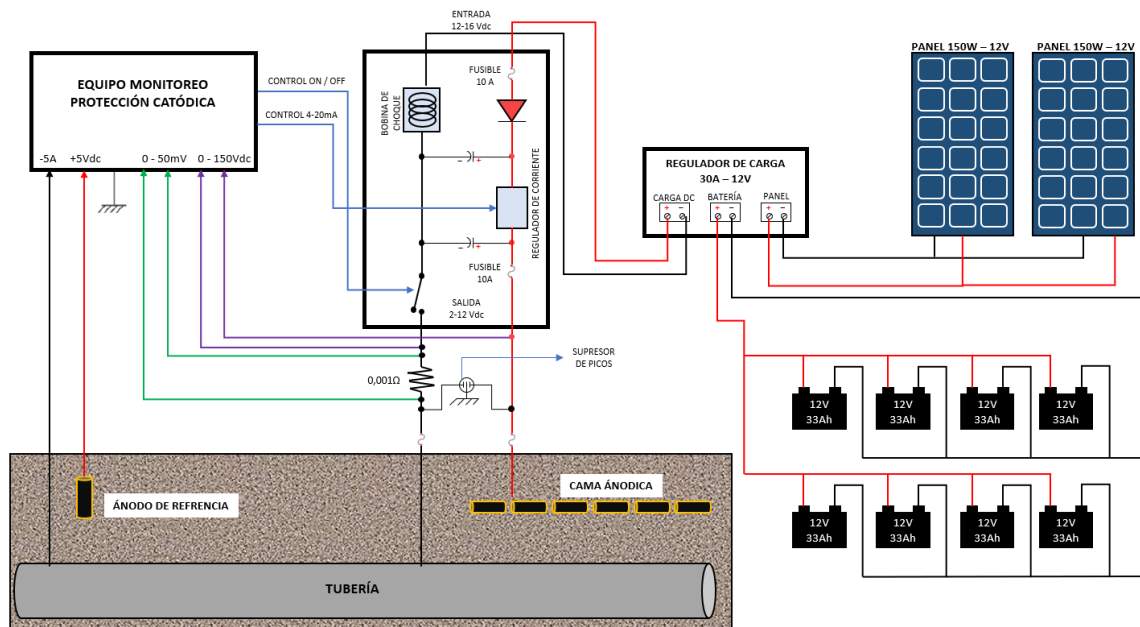
Resumen de los parámetros del sistema de alimentación fotovoltaico del rectificador Loma Colorada

CONSUMO NOMINAL REQUERIDA POR EL SPC	967.1131 Wh/Día
CONSUMO CARGA CORREGIDO	1063.8244 Wh/Día
TENSIÓN DEL SISTEMA	12 V
CAPACIDAD PANELES SOLARES	193.4226 W
POTENCIA PANEL SOLAR SELECCIONADO	150 W
NÚMERO DE PANELES SOLARES A INSTALAR	2 (EN PARALELO)
CAPACIDAD BANCO BATERÍAS	230.4953 Ah
BATERÍAS SELECCIONADAS	33 A - 12V
NÚMERO DE BATERÍAS A INSTALAR	8 (EN PARALELO)
CAPACIDAD REGULADOR DE CARGA	21.4 A - 12 V
REGULADOR DE CARGA SELECCIONADO	30 A - 12 V

Nota: (Autor,2021)

Figura 21

Esquema del sistema de protección catódica gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia Cuatro Vientos



Nota: (Autor, 2021). Esta figura representa el esquema de conexiones de los elementos que conforman el sistema de protección catódica Pueblo Nuevo - Bosconia - Cuatro Vientos.

6. Integración de las Variables de Protección Catódica Mediante un Controlador

Automatizado PID al Sistema SCADA

Mediante la utilización de equipos XARTU/1 CATHODIC PROTECTION de EAGLE RESERCH CORPORTION, se puede realizar una programación, para monitorear, controlar y adquirir datos en tiempo real y de manera remota de las principales variables de los sistemas de protección catódica de los gasoductos Bosconia - Valledupar, Bosconia Tucurinca y Pueblo Nuevo - Bosconia – Cuatro Vientos.

El equipo XARTU/1 CATHODIC PROTECTION es básicamente una RTU en conjunto con un rectificador DC y enlazado con un modem GPRS.

Mediante la implementación de estos equipos se suple completamente la funcionalidad de los rectificadores AC/DC.

6.1 Unidad Terminal Remota

La unidad terminal remota “UTR” o más conocida por sus siglas en ingles “RTU” (Remote Terminal Unit), es un dispositivo electrónico conformado por un conjunto de microcontroladores especializados, los cuales poseen múltiples entradas y salidas análogas y digitales, por medio del cual, se pueden monitorear y controlar las principales variables de un proceso, y mediante un enlace con un equipo de telemetría, se puede comunicar a un sistema SCADA.

6.2 Generalidades de control lineal

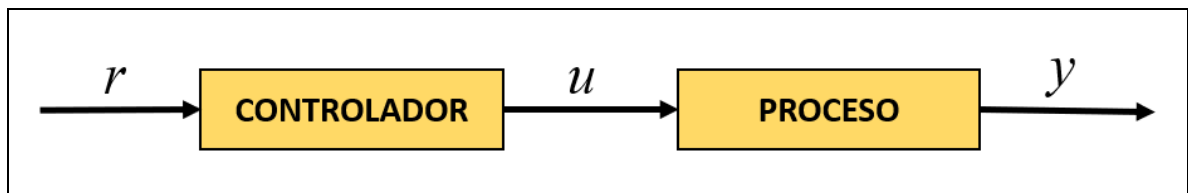
En la actualidad, los sistemas de control representan una parte fundamental para el mejoramiento y la optimización de todos los procesos industriales contemporáneos.

Prácticamente, cualquier avance tecnológico en la industria moderna lleva inherente algún sistema de control.

Los sistemas de control pueden funcionar en uno de dos modos diferentes: ya sea como un sistema de lazo abierto (ver figura 22) o un sistema de lazo cerrado (ver figura 23).

Figura 22

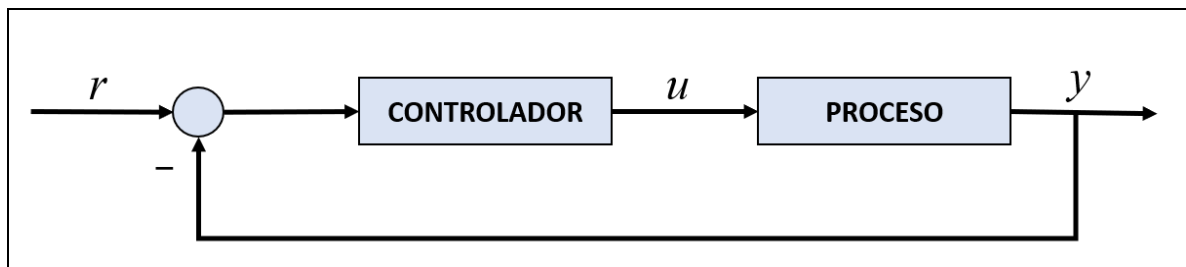
Sistema de control en lazo abierto



Nota: (Autor,2021)

Figura 23

Sistema de control en lazo cerrado



Nota: (Autor,2021)

En ambas figuras se observan tres señales, donde **(r)** es la señal de referencia, **(u)** es la salida del controlador, y **(y)** es la variable controlada.

Un sistema de control en lazo abierto es un sistema no retroalimentado, en donde la variable controlada no tiene ningún efecto directo sobre la acción de control. Y un sistema de control en lazo cerrado es un sistema retroalimentado, en donde la variable controlada tiene efecto directo sobre la acción de control.

En todo sistema de control debe tener presente tres (3) operaciones básicas, las cuales son:

Medición: Consiste en medir la variable controlada.

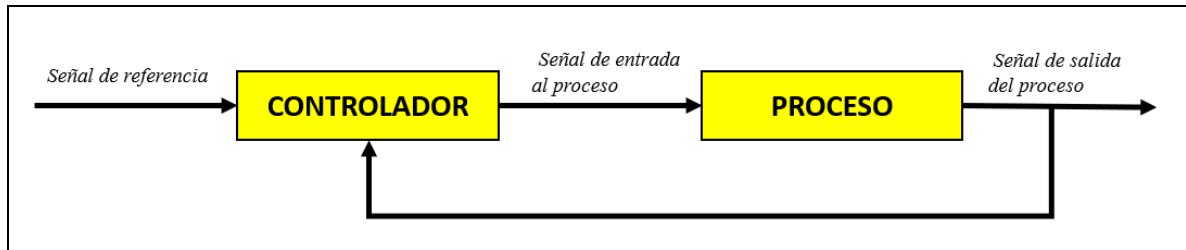
Decisión: teniendo en cuenta la medición, el controlador resuelve que hacer para conservar la variable controlada en el valor deseado.

Acción: como resultado de la directriz del controlador, se debe efectuar una acción en el sistema, ésta es realizada por un elemento final de control.

El objetivo de este proyecto se basa en sistemas de control en lazo cerrado o sistemas de control retroalimentados, por tal motivo lo analizaremos a profundidad.

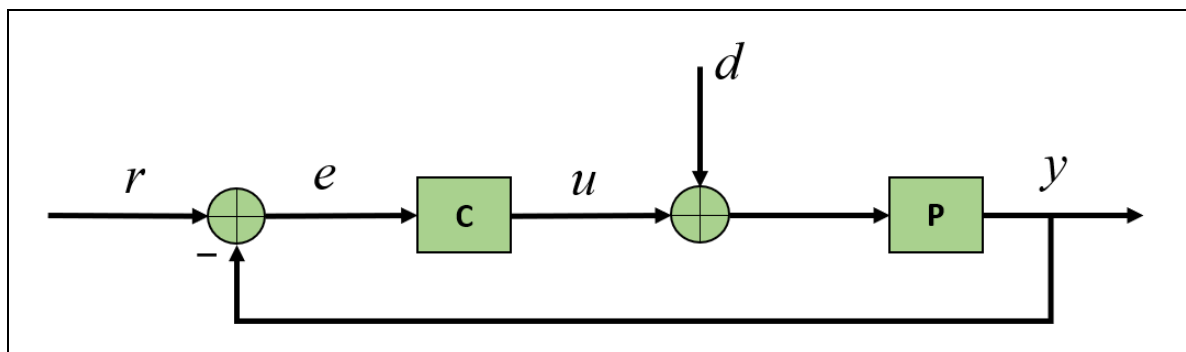
6.2.1 Sistemas de control retroalimentados

La idea de la retroalimentación es la base de la teoría de control, como se puede observar en la figura 24, el controlador establece la señal de entrada al proceso usando también la medición de la señal de salida y la señal de referencia.

Figura 24*Esquema típico de un sistema de control retroalimentado*

Nota: (Autor,2021)

El diagrama de bloques que se considera en la figura 25, donde (p) es el proceso y (c) el controlador. La señal controlada (y) es retroalimentada al controlador y este a su vez la compara con la señal de referencia (r), dando origen a la señal de error (e). El controlador es el cerebro del sistema y envía una señal actuante (u) a través del sistema para corregir el error. El termino (d) representa la perturbación del sistema, la cual es causante de la dinámica de la señal de la variable controlada.

Figura 25*Diagrama de bloques esquemático de un sistema de control retroalimentado*

Nota: (Autores,2021)

Vale la pena resaltar que la principal razón para utilizar el circuito cerrado de control se debe a la incertidumbre, tanto en el modelo del proceso como en las perturbaciones que actúan sobre el mismo proceso.

6.3 Controlador Proporcional – Integral – Derivativo (PID)

Los controladores PID a través de la historia han demostrado ser fuertes, dinámicos y propicios en el control de diversas aplicaciones fundamentales en todas las industrias. En la actualidad se cuenta con la disponibilidad de un amplio abanico de referencias en el mercado de controladores, que brindan avances y nuevos métodos desarrollados en el área de control, aun así, se puede decir que el controlador PID es el tipo de controlador más utilizado en toda la industria contemporánea.

6.3.1 Acciones de un controlador PID

Un controlador PID consta de tres constantes: proporcional, integral y derivativa.

Un controlador PID se puede programar con una sola acción de control, como un controlador para acción proporcional (P). Asimismo, se puede utilizar como una mezcla de dos y tres de las acciones de control, como un controlador para acciones proporcional – integral (PI), un controlador para acciones proporcional – derivativo (PD) y como un controlador para acciones proporcional – integral - derivativo (PID).

En realidad, no existen controladores que actúen exclusivamente con una acción integral o derivativa, siempre actúan en combinación de la acción proporcional.

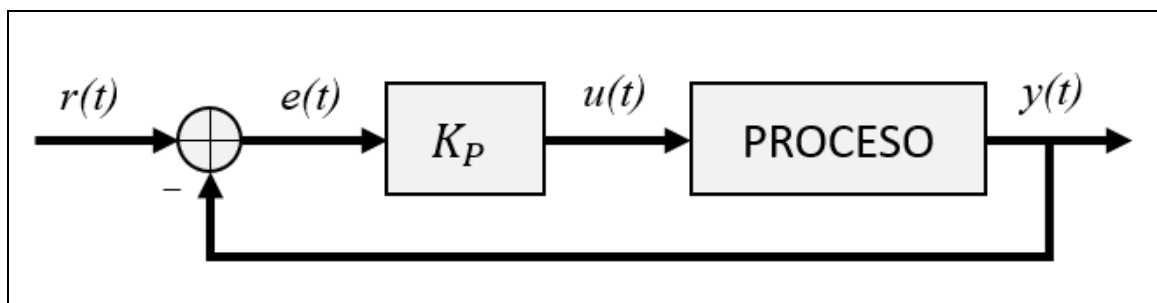
6.3.2 Acción proporcional

La acción de control proporcional está determinada por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_P e(t)$$

Figura 26

Esquema de un sistema de control retroalimentando con ganancia proporcional



Nota: (Autor, 2021). En esta figura se presenta esquemáticamente el funcionamiento de un controlador de ganancia proporcional pura.

Donde

$u(t)$ es la señal de salida del controlador

K_P es la ganancia proporcional del controlador para compensar el error del sistema, en términos generales se podría decir que es un múltiplo ajustable del porcentaje del cambio en la medición de la variable controlada.

$e(t)$ es el error del sistema, es la diferencia entre la señal de referencia con respecto a. la señal de salida de la variable controlada

La función transferencia de un controlador proporcional puro se define como:

$$C(s) = K_p$$

El principal problema de utilizar un controlador de acción proporcional pura es que no elimina completamente el error de estado estacionario (off set). El añadir un sesgo en la ecuación principal mejora sustancialmente su funcionalidad, quedando definida de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p e(t) + u_b$$

Donde u_b es el sesgo y se define como:

$$u_b = \frac{u_{m\acute{a}x} + u_{m\acute{i}n}}{2}$$

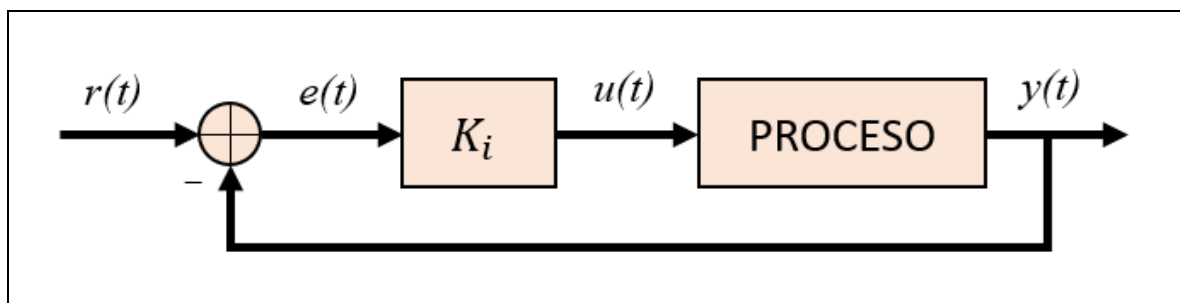
6.3.3 Acción integral

La acción integral da una señal de salida del controlador que es proporcional a la integral de la señal del error acumulado, y se define como:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) \cdot dt$$

Figura 27

Esquema de un sistema de control retroalimentando con ganancia integral



Nota: (Autor, 2021). En esta figura se presenta esquemáticamente el funcionamiento de un controlador de ganancia integral pura.

K_i es la ganancia integral y está definida por los valores pasados acumulados de la señal del error. La función transferencia se define como:

$$C(s) = \frac{K_i}{s}$$

Este tipo de acción elimina completamente el error de estado estacionario, pero es un modo de control lento.

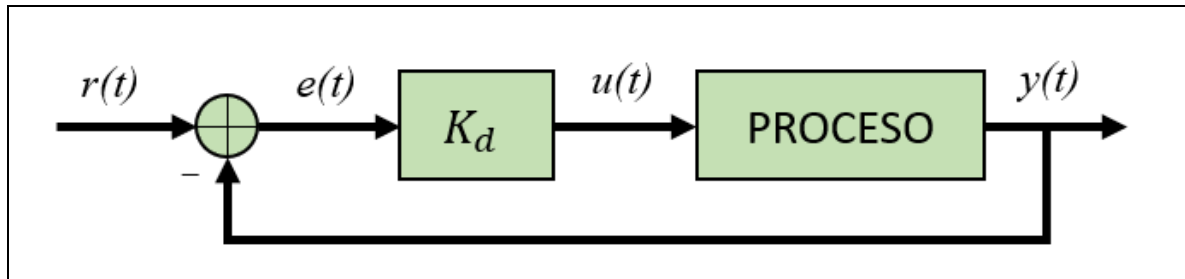
6.3.4 Acción derivativa

Mientras la acción de control proporcional se fundamenta en el valor actual de la señal de error y la acción de control integral se rige por los valores pasados acumulados de la conducta de la señal de error, la acción derivada tiene como base predecir los valores futuros de acuerdo con el comportamiento de la señal de error. La ley de una acción de control derivativa se puede expresar como:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Figura 28

Esquema de un sistema de control retroalimentando con ganancia derivativa



Nota: (Autor, 2021). En esta figura se presenta esquemáticamente el funcionamiento de un controlador de ganancia derivativa pura.

La función transferencia se define como:

$$C(s) = K_d s$$

Una ganancia derivativa representa una respuesta del controlador más rápida. Pero, una ganancia derivativa grande trae como consecuencia vibraciones a un sistema, por consiguiente, la cantidad de ganancia derivativa debe ser restringida.

6.3.5 Acción proporcional - integral – derivativa (PID)

La acción de control PID es la combinación de las acciones proporcional, integral y derivativa, y es donde se congregan las ventajas de cada una de las acciones. La acción de control proporcional se fundamenta en el valor actual de la señal de error, la acción de control integral se rige por los valores pasados acumulados de la conducta de la señal de error y la acción derivada tiene como base predecir los valores futuros de acuerdo con el comportamiento de la señal de error. La ley de una acción de control PID se puede expresar como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) \cdot dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

y su función transferencia resulta:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

También se puede reescribir de la siguiente forma:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Donde: T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo y se definen mediante las siguientes expresiones

$$T_i = \frac{K_p}{K_i}, \quad Y \quad T_d = \frac{K_d}{K_p}$$

En este trabajo se va a utilizar un controlador de acción proporcional, integral y derivativa (PID).

Figura 29*Fotos del montaje*

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.). En esta imagen se observa el montaje de los diferentes elementos que conforman el sistema de protección catódica Bosconia – Tucurínca.

7. Evaluación del Desempeño del Nuevo Sistema De Protección Catódica de la Red De Gasoductos de Interconexión Magdalena - Cesar de Acuerdo con la Norma SP-0169

Establecida Por NACE INTERNATIONAL

En este capítulo se describirán los criterios de protección catódica recomendados por la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión de Estados Unidos (NACE INTERNATIONAL) en el estándar practico SP0169 de 2013, empleados para el control de la corrosión en tuberías de acero enterradas. Y la técnica de inspección de intervalo de potencial cerrado (CIPS) “Close Interval Potential Survey”, empleada para validar la eficacia de la protección catódica en la red de gasoductos de acero de interconexión Magdalena - Cesar propiedad de la empresa Gases del Caribe S.A. E.S.P., para finalmente analizar los datos obtenidos y definir si realmente cumple a cabalidad con esta normativa, que garantiza una buena práctica de ingeniería en la gestión de la corrosión en la integridad del activo.

7.1 Descripción del Método

7.1.1 Descripción del estándar practico NACE SP0169-2013

El estándar NACE SP0169 de 2013, en el numeral 6.2.1 define los criterios para tuberías de acero enterradas los cuales sirven para determinar si se ha alcanzado el nivel de protección catódica adecuada.

7.1.1.1 Criterio de desplazamiento de polarización. El numeral 6.2.1.2 define “Un mínimo de 100 mV de polarización catódica. Se debe medir la formación o la caída de la polarización para satisfacer este criterio” (NACE Standard SP0169, 2013, p. 17). Este criterio se refiere a que se debe garantizar un mínimo de 100 mV de polarización catódica entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia cobre sulfato de cobre

(Cu/cuSO₄) en contacto directo con el electrolito. Para satisfacer este criterio, debe medirse la formación como el decaimiento de la polarización.

7.1.1.2 Criterio de potencial. La práctica recomendada en el numeral 6.2.1.3, ofrece el siguiente criterio de potencial. “Un potencial de estructura a electrolito de –850 mV o más negativo medido con respecto a un electrodo de referencia de cobre / sulfato de cobre saturado (CSE). Este potencial puede ser una medida directa del potencial polarizado o un potencial de corriente aplicada. La interpretación de una medición aplicada a la corriente requiere la consideración de la importancia de las caídas de voltaje en la tierra y en los caminos metálicos” (NACE Standard SP0169, 2013, p. 17, p. 18).

Sin embargo, en el numeral 6.2.1.4.1, considera unos criterios adicionales, para aplicar en condiciones especiales. “Cuando se presente una corrosión influenciada microbiológicamente activa o (por ejemplo, causada por bacterias sulfato reductoras), los criterios enumerados en los párrafos 6.2.1.2 y 6.2.1.3 pueden no ser suficientes. En algunas condiciones, se puede requerir un potencial polarizado de –950 mV respecto a un electrodo cobre sulfato de cobre o más negativo o hasta 300 mV de polarización catódica (NACE Standard SP0169, 2013, p. 18).

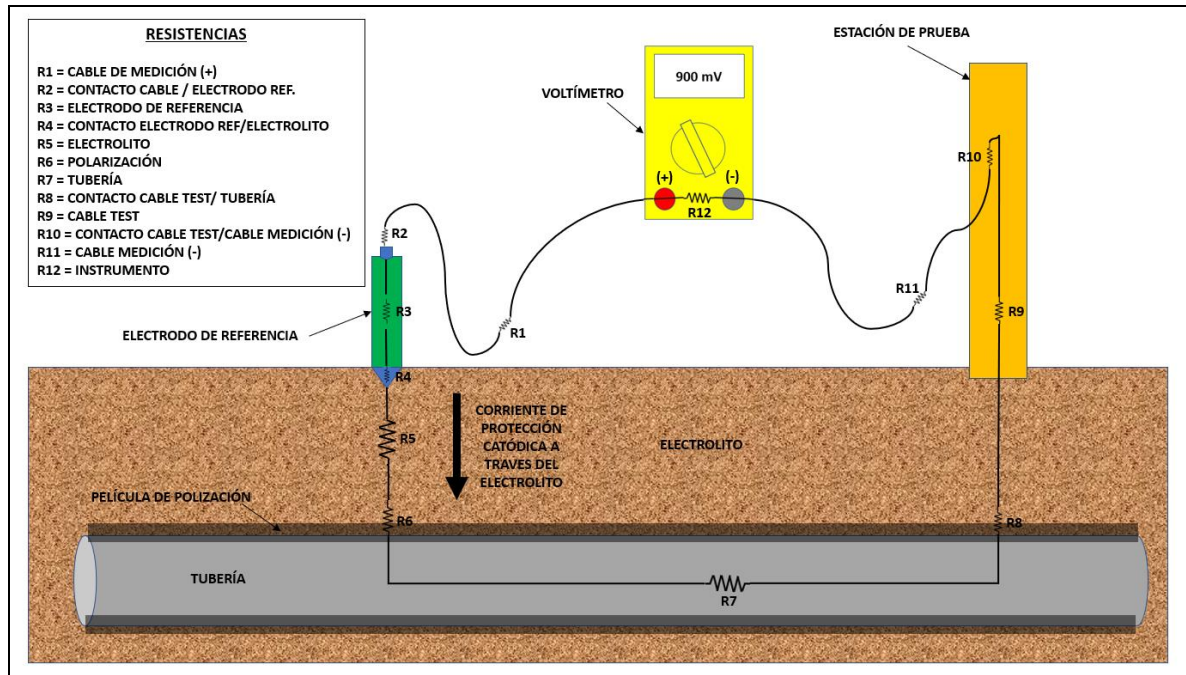
El diseño del sistema de protección catódica de este proyecto adoptó el criterio de potencial polarizado especial descrito en el numeral 6.2.1.3, de por lo menos un potencial polarizado de -850 mV respecto a un electrodo de referencia de cobre sulfato de cobre saturado (Cu/CuSO₄) y como parámetro de límite crítico, se definió que el potencial polarizado no debe ser más negativo de -1200 mV, con respecto a electrodo portátil de Cu/CuSO₄, con el objeto de prevenir posible afectación del recubrimiento por desprendimiento catódico.

7.1.2 Consideración de la caída óhmica

Para valorar el nivel de protección catódica de una tubería enterrada, es imprescindible medir el nivel de polarización tubería/suelo con respecto a un electrodo de referencia. Ese nivel de polarización se llama potencial polarizado (E_p), y es la suma del potencial natural de corrosión y la polarización.

Al medir potenciales de tubería para compararlos con los criterios, se debe tener presente que la polarización contiene intrínseco un elemento denominado caída óhmica o caída IR. Este fenómeno se manifiesta principalmente en el electrolito o en la interfase con la tubería, o en ambos. Este componente de caída IR debe eliminarse de las mediciones, para realmente verificar el cumplimiento de algún criterio de protección.

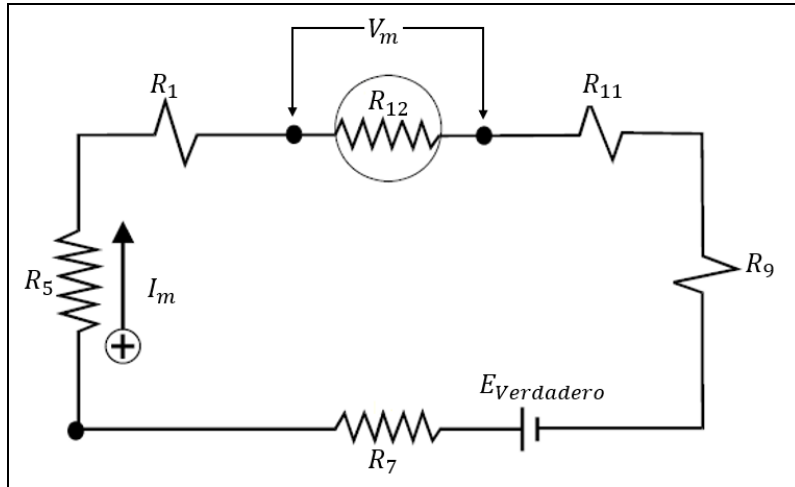
En la figura 30 se muestra todas las caídas óhmicas presentes en un circuito de medición de potencial de tubería.

Figura 30*Caídas óhmicas en un circuito de medición de potencial*

Nota: (Autor, 2021). En esta figura se representan todas las resistencias que se generan en un circuito de medición de potencial.

Se puede decir que, si se cumple con las siguientes consideraciones de la figura 30 se pueden despreciar unas resistencias del circuito: cuando los puntos de contactos metal/metal son buenos, se supone que las resistencias R2, R8 y R10 son despreciables. De igual manera cuando en el contacto de electrodo de referencia y el electrolito hay presencia de humedad o la superficie de contacto es grande, se supone que la resistencia R3 Y R4 son despreciables. Así mismo si el instrumento de medición es de alta impedancia se asume que la resistencia R12 es despreciable.

Teniendo en cuentas las consideraciones anteriores se puede simplificar el circuito representado en la figura 30, quedando de la siguiente manera como se observa en la figura 31.

Figura 31*Circuito eléctrico de caídas óhmicas simplificado*

Nota: (Autor, 2021). Esta figura muestra el circuito de caídas óhmicas simplificado de la figura 30, teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas.

Se asume que $E_{Verdadero} = E_p - E_{Ref}$, donde el $E_{Ref} = 0$, puesto el electrodo de referencia está en equilibrio y su potencial es cero, y E_p es el potencial polarizado de la tubería.

Aplicando la ley de voltaje de Kirchoff queda de la siguiente manera:

$$E_p = V_m + (V_1 + V_9 + V_{11}) + V_5 + V_7$$

Podemos decir que:

$$V_{Conductores} = V_1 + V_9 + V_{11}; V_{Electrolito} = V_5; V_{Paso Metálico} = V_7$$

$$E_p = V_m + V_{Conductores} + V_{Electrolito} + V_{Paso Metálico}$$

Luego despejando V_m

$$V_m = E_p - (V_{Conductores} + V_{Electrolito} + V_{Paso Metálico})$$

Escribiendo la misma ecuación según la ley de ohm en términos de resistencia y corriente y asumiendo que la única corriente presente en el circuito sea $I_{PC} = \text{Corriente de protección Catódica}$, tenemos:

$$V_m = E_p - (I_{PC} * R_{Conductores} + I_{PC} * R_{Electrolito} + I_{PC} * R_{Paso Metálico})$$

En la práctica se asume que la resistencia de los conductores es despreciable por lo tanto las resistencias que afectan directamente la caída óhmica son la del electrolito y la tubería misma. Se debe tener presente que el error se suma o se resta, dependerá de la dirección de la corriente. Finalmente, la ecuación puede expresarse del siguiente modo:

$$V_m = E_p \pm (I_{PC} * R_{Electrolito}) \pm (I_{PC} * R_{Paso Metálico})$$

Existen varios métodos para eliminar el error por caída óhmica como lo son:

Electrodo de referencia cerca de la tubería.

Reducción de la corriente por etapas

Electrodo de referencia remoto

Cupones de corrosión

Interrupción de la corriente

Sin embargo, el método más utilizado y efectivo para prescindir del error provocado por la caída óhmica es la interrupción de la corriente, este será revisado a profundidad.

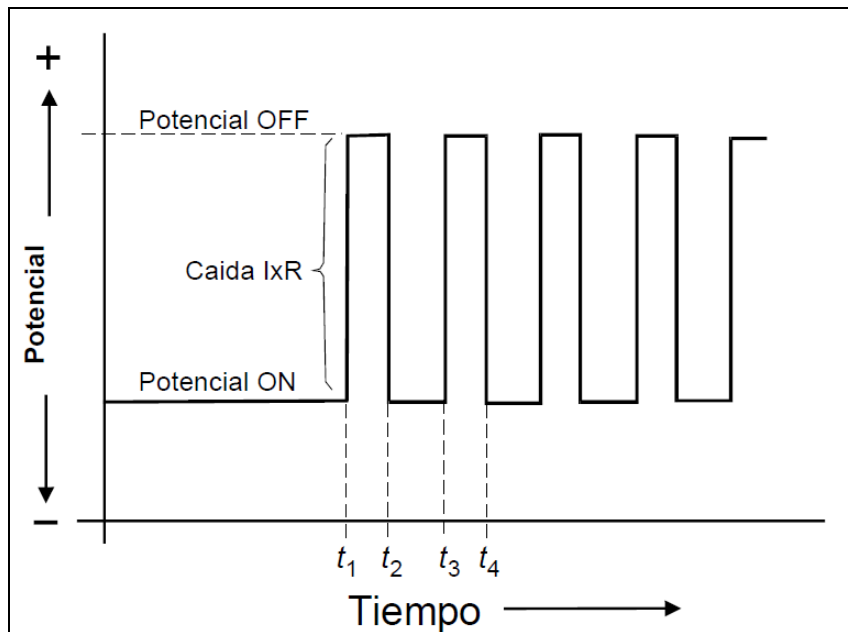
7.1.2.1 Interrupción de la corriente. Este método consiste en llevar a cero la corriente de protección catódica, dando como consecuencia la eliminación del producto IXR en la medición del potencial de tubería respecto a un electrodo de referencia, eliminando así la caída óhmica.

$$V_m = E_p \pm (I_{PC} * R_{Electrolito}) \pm (I_{PC} * R_{Paso Metálico})$$

La corriente de protección catódica se interrumpe brevemente, de modo que la tubería no se despolarice significativamente y se mide el potencial ipso facto después de la interrupción, este se denomina potencial off o potencial instant-off. La corriente se interrumpe empleando un interruptor cíclico que se introduce en el circuito de protección catódica y se configuran los tiempos de duración del ciclo encendido o “ciclo ON” y del ciclo apagado o “ciclo OFF” como se muestra en la figura 32.

Figura 32

Ilustración gráfica del ciclado de corriente en el método de interrupción de corriente



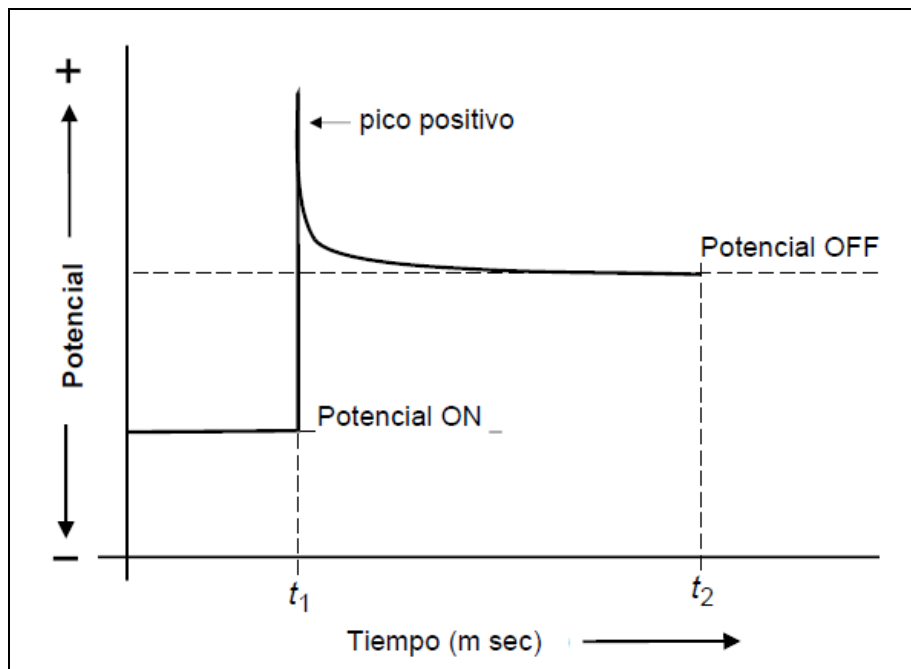
Nota: Datos tomados de *CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica* (p.334), por NACE INTERNATIONAL, Bogota: Manual del curso; 2007.

El ciclado del interruptor de corriente acorde con la figura 32, se define de la siguiente manera: en el tiempo t_1 el interruptor se encuentra encendido y suspende el paso de corriente entre los tiempos $t_2 - t_1$ y nuevamente en el tiempo t_2 permite el paso de corriente hasta el tiempo t_3 . Las buenas prácticas de ingeniería en la literatura recomiendan que el ciclo ON comprendido en los tiempos $t_3 - t_2$ debe ser por lo menos el doble del ciclo OFF comprendido en el tiempo $t_2 - t_1$. Sin embargo, cuando se interrumpe la corriente de protección catódica se presenta un pico considerable debido a efectos de capacitancia e inductancia, y es muy importante tener esta consideración

presente para medir el potencial off, lo ideal es medir el potencial off después de haber pasado el pico y antes que se despolarice significativamente la tubería, como se muestra en la figura 33. “generalmente el pico dura menos de 300 milisegundos, después de lo cual puede registrarse el potencial off sin incorporar este error transitorio en la medición de potencial (CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica manual del curso, 2007, p. 366).

Figura 33

Representación del pico positivo en el ciclado de corriente cuando se interrumpe la corriente de protección catódica



Nota: Datos tomados de *CP3 Cathode Protection 3 – técnico superior en protección catódica* (p.336), por NACE INTERNATIONAL, Bogotá: Manual del curso; 2007.

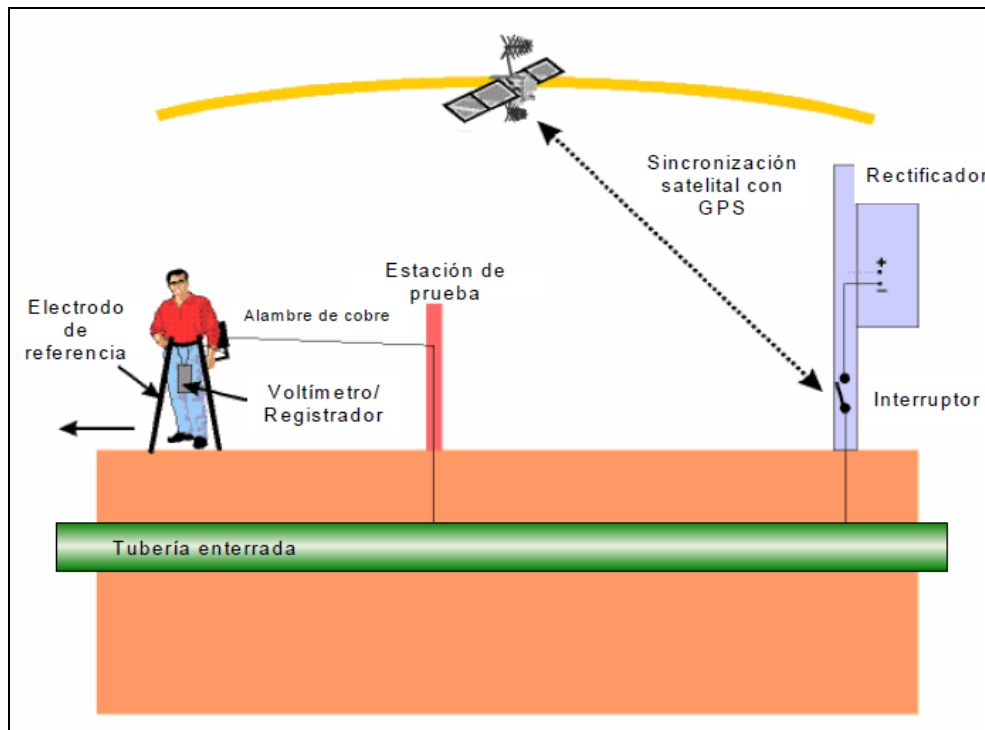
En la figura 33 se representa el pico generado en el ciclado de la corriente de protección catódica en la toma de potenciales en una tubería. Si en el tiempo t_2 es el instante donde se mide el potencial off, se puede decir que $t_2 - t_1 \geq 300 \text{ mV}$, para eliminar el pico en la medición.

7.1.3 Técnica de inspección de intervalo de potencial cerrado (CIPS)

La técnica de inspección de intervalo de potencial cerrado o en ingles Close Interval Potential Survey, (CIPS), es un método de medición directa de la corrosión externa en tuberías enterradas. Básicamente consiste en examinar la efectividad de un sistema de protección catódica en la totalidad del trazado de la tubería instalada.

Las tuberías de acero enterradas que son protegidas mediante un sistema de protección catódica tienen instaladas estaciones de pruebas cada determinada longitud, esta distancia varía según normativas locales y consideración del diseñador del sistema de protección catódica. Las estaciones de pruebas tienen como funcionalidad monitorear el potencial de la tubería. En la red de gasoductos de interconexión Magdalena – Cesar, se instalaron estaciones de pruebas cada 500 metros.

La técnica CIPS consiste en realizar mediciones del potencial de la tubería respecto a un electrodo de referencia cobre sulfato de cobre saturado (Cu/CuSO_4) entre las estaciones de prueba abarcando la totalidad de la longitud de la tubería instalada, esta medición se realiza en intervalos entre 1m y 5m. Para eliminar el error por caída óhmica se emplea el método de interrupción de corriente, en este se instala un interruptor de corriente aguas abajo del rectificador y se configura unos tiempos del ciclado del corriente accionado bajo una sincronización satelital con GPS, como se muestra en la figura 34.

Figura 34*Configuración del CIPS*

Nota: (BALETA JIMENEZ, Fabian José y JACANAMIJOY, Wilmer Arrieta, 2007).

Esta figura representa el esquema de funcionamiento de la inspección CIPS

7.2 Detalles de la Inspección CIPS Realizada

A continuación, se lista los detalles de la inspección realizada:

En el rectificador del sistema de protección catódica fue instalado un interruptor cíclico de corriente sincronizado satelitalmente para permitir la medida de potenciales ON e INSTANT OFF. El ciclo para llevar a cabo la inspección fue 0.7 segundos encendido o cerrado (ON) y 0.3 segundos apagado o abierto (OFF).

Potenciales tubería-suelo (ON e INSTANT OFF) fueron medidos usando un electrodo de referencia de Cobre/Sulfato de Cobre ($\text{Cu}/\text{Cu SO}_4$) en intervalos entre 1m y 1.5m sobre el trazado del gasoducto y registrados en un Datalogger.

La medida y el registro de potenciales fue realizado continuamente entre las estaciones de prueba instaladas cada 500m. El terminal positivo del voltímetro fue conectado a un alambre esmaltado de inspección (34AWG), el mismo que fue conectado a un terminal de la estación de prueba; mientras que el terminal negativo fue conectado al electrodo de referencia cobre sulfato de cobre saturado (Cu/CuSO_4)

7.3. Resultados y Análisis

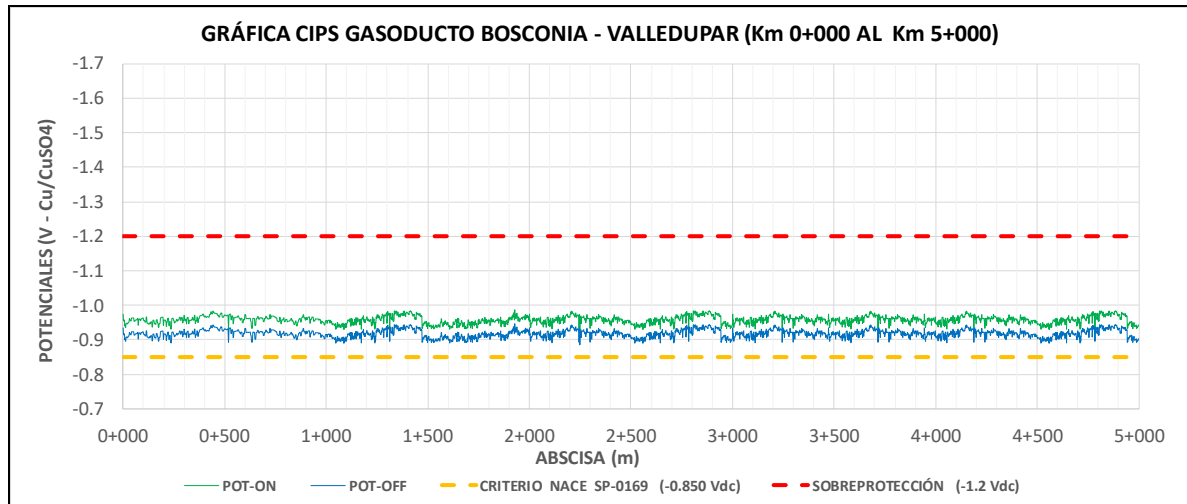
7.3.1 Resultados del CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar

Con la realización de la toma de potencial paso a paso en el gasoducto Bosconia – Valledupar se evidenció que cumple con el criterio NACE SP0169-2013 de los -850mV Vs un electrodo de referencia Cu/CuSO_4

Los valores de potenciales tubería-suelo registrados a lo largo del gasoducto son presentados en gráficas agrupadas en tramos de aproximadamente de 5Km.

Figura 35

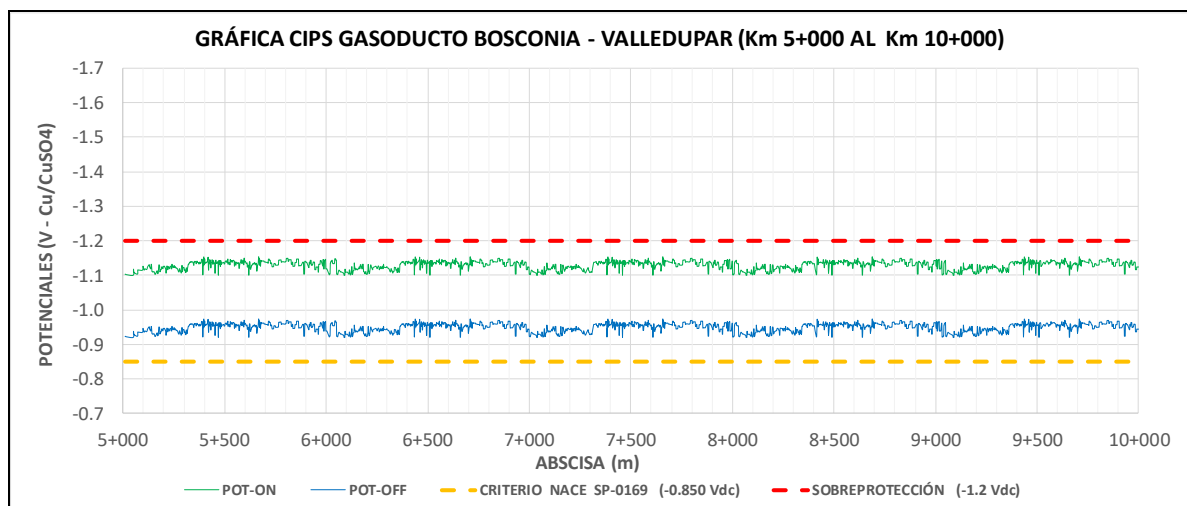
Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 0+000 al Km 5+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 36

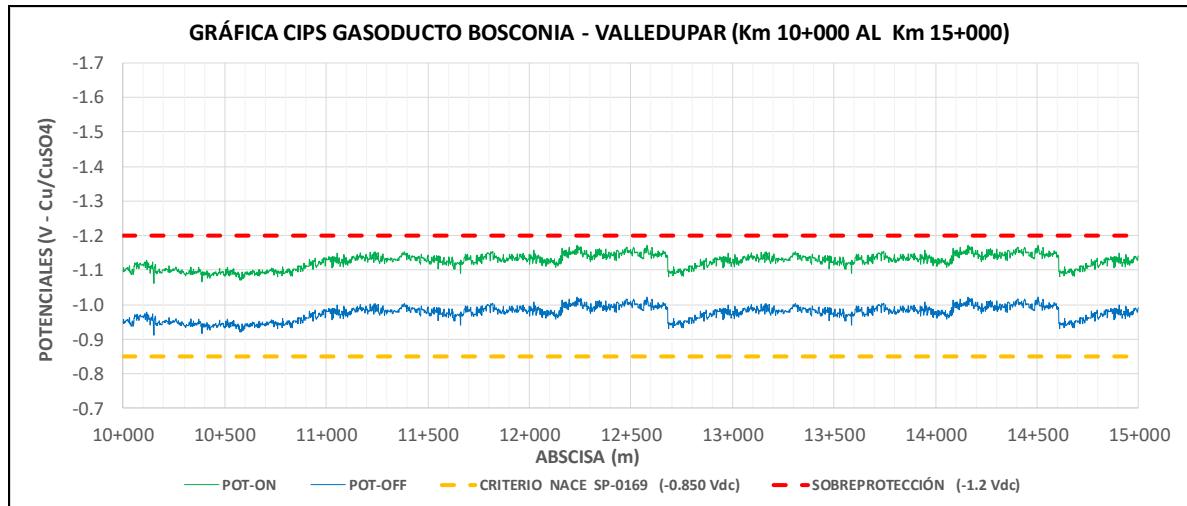
Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 5+000 al Km 10+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 37

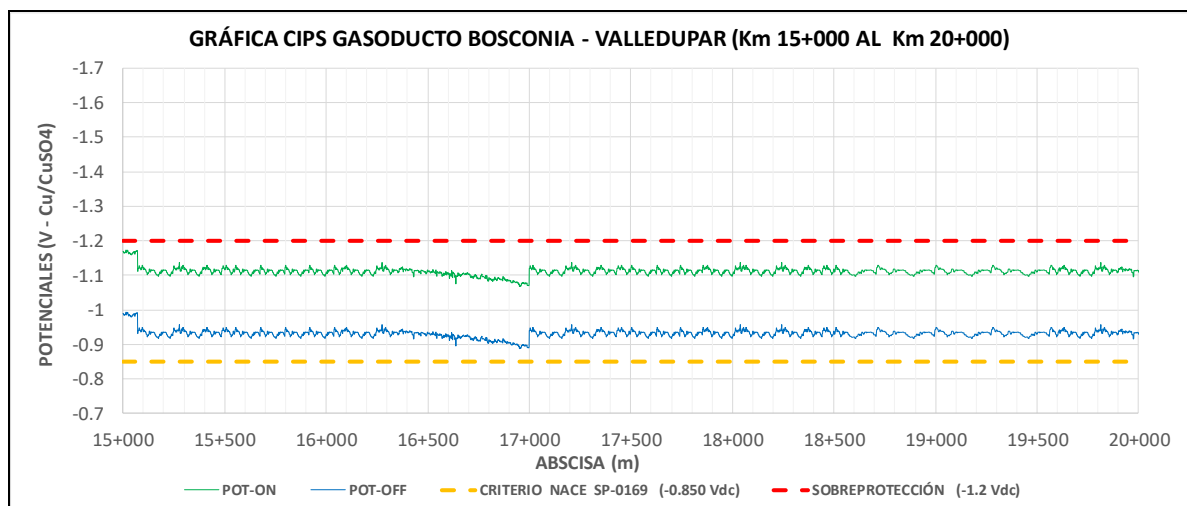
Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 10+000 al Km 15+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 38

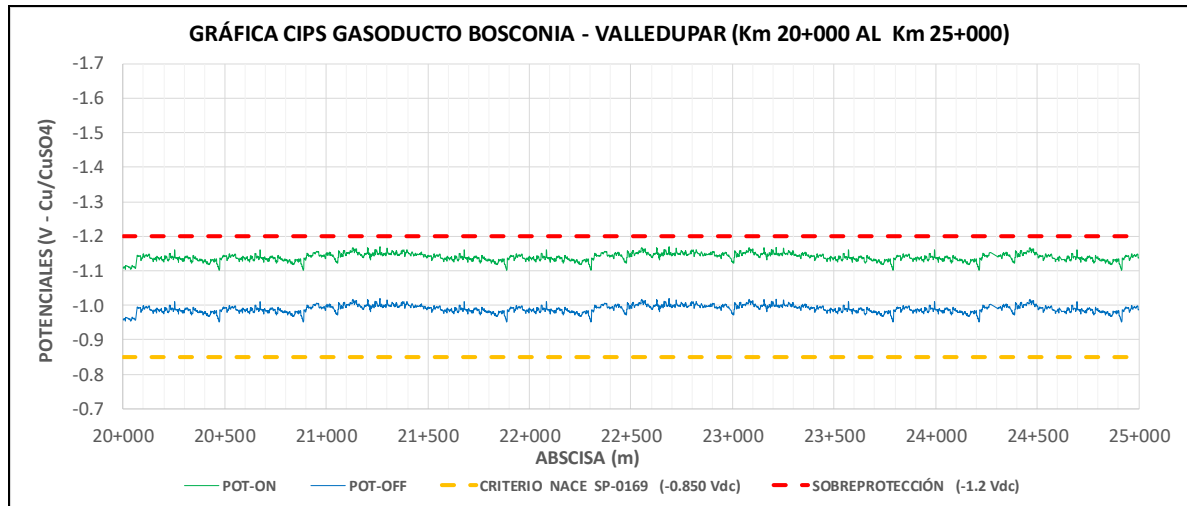
Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 15+000 al Km 20+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 39

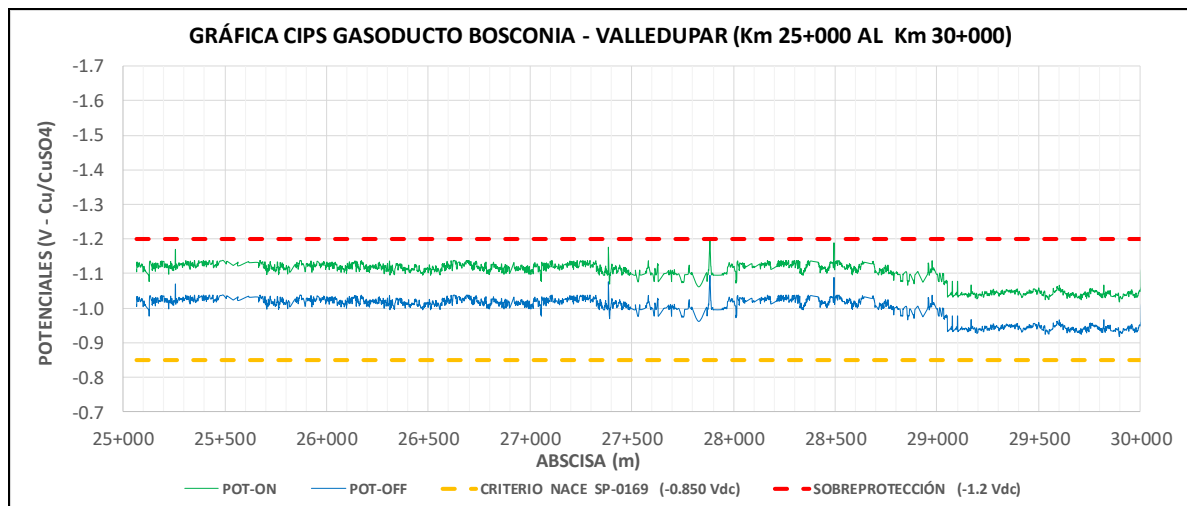
Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 20+000 al Km 25+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 40

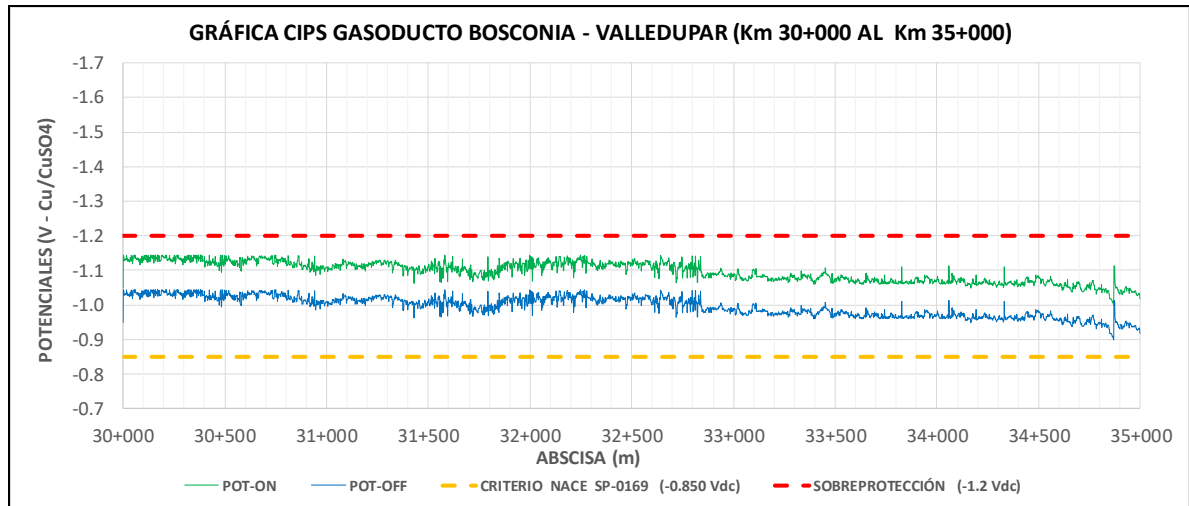
Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 25+000 al Km 30+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 41

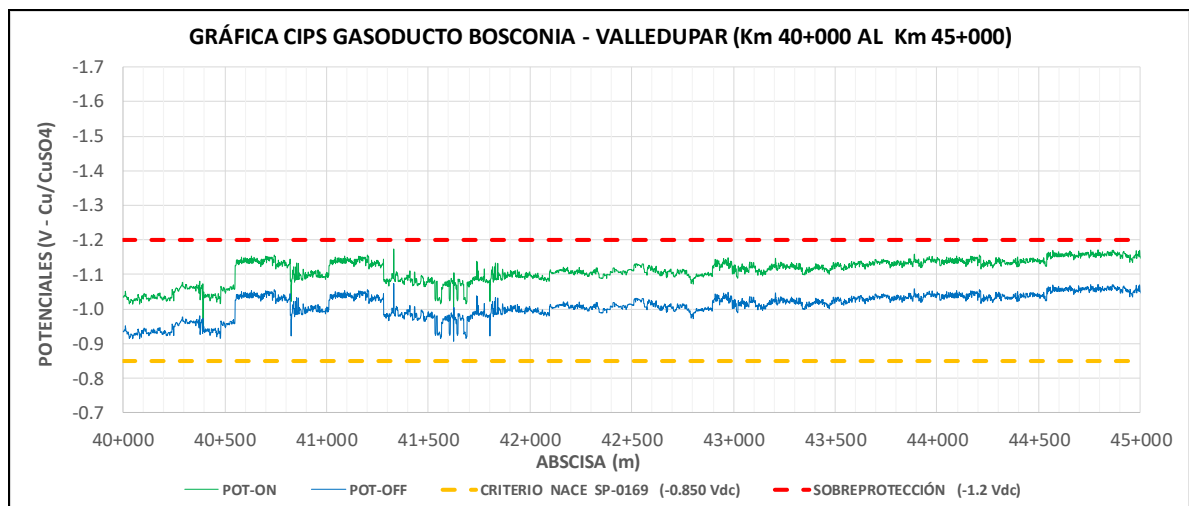
Grafica CIPS gasoducto Bosconia – Valledupar (Km 30+000 al Km 35+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 42

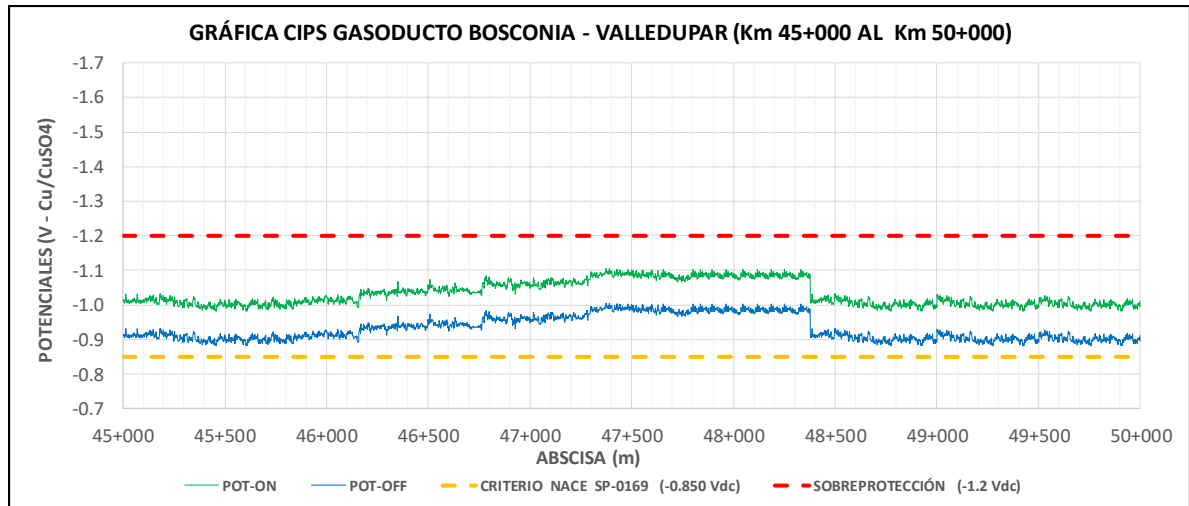
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 35+000 al Km 40+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 43

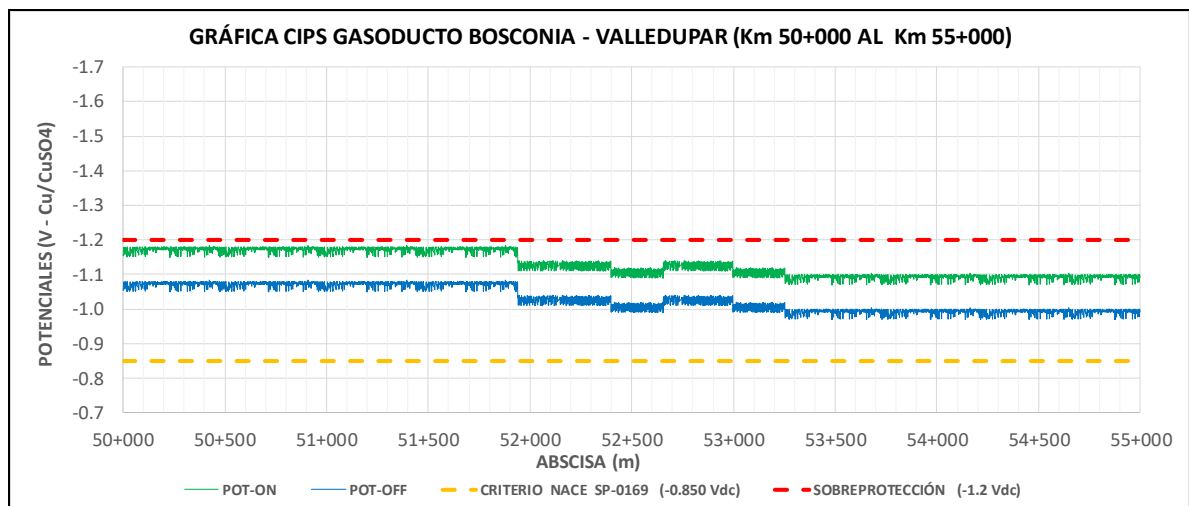
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 45+000 al Km 50+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 44

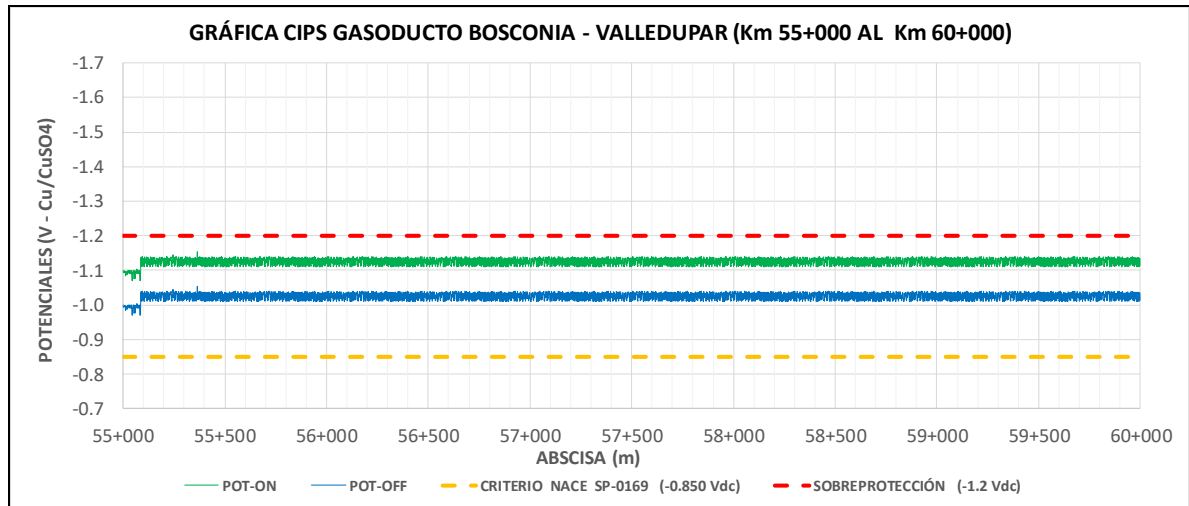
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 50+000 al km 55+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 45

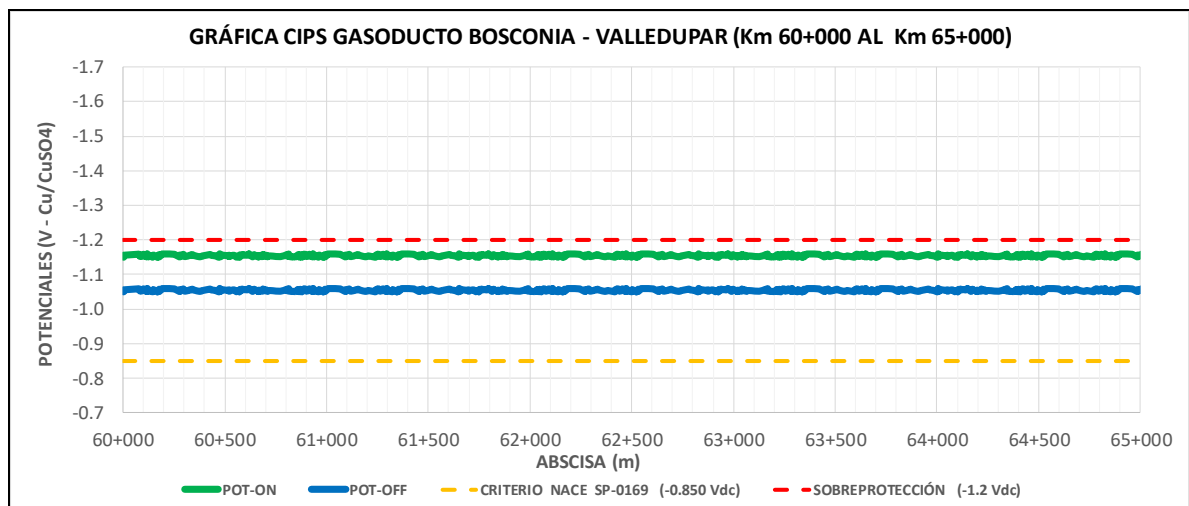
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 55+000 al km 60+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 46

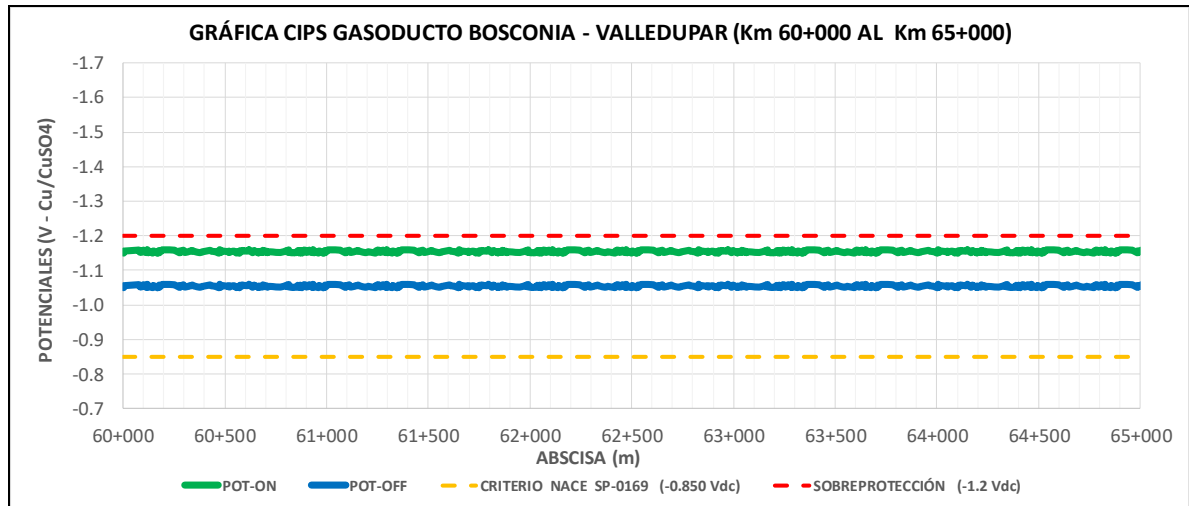
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 60+000 al km 65+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 47

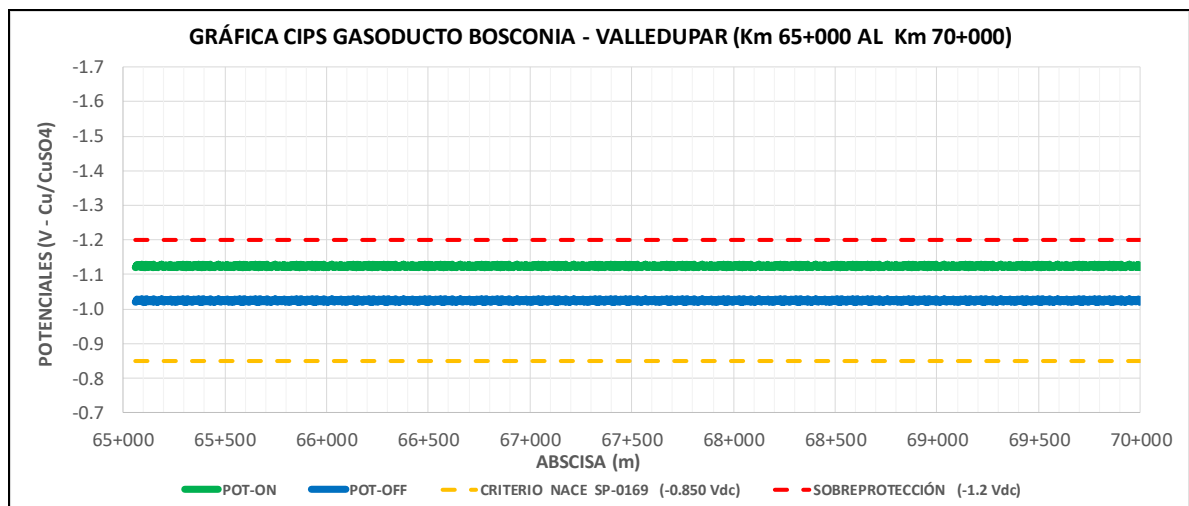
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 60+000 al km 65+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 48

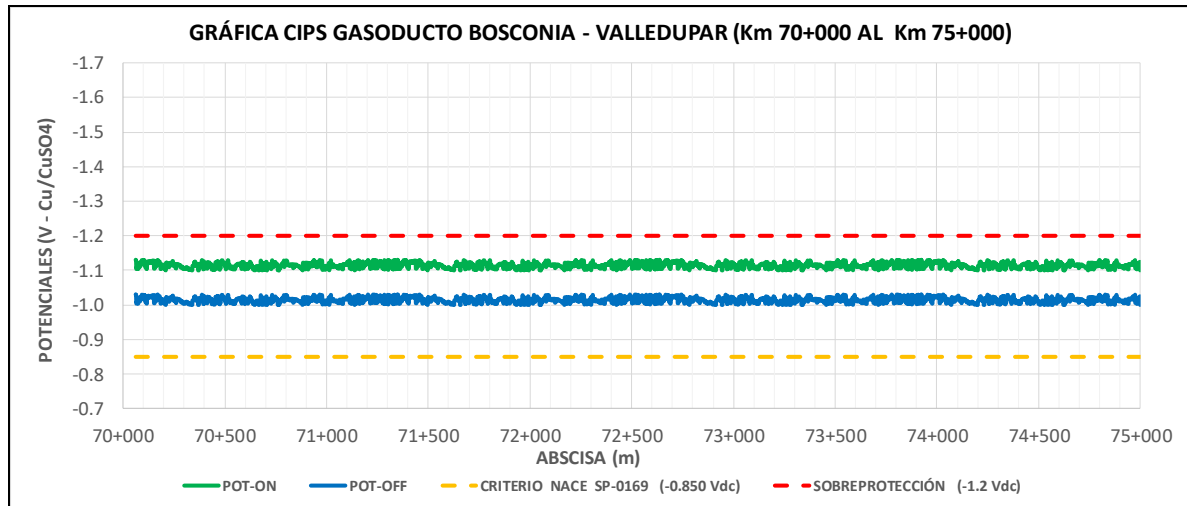
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 65+000 al km 70+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 49

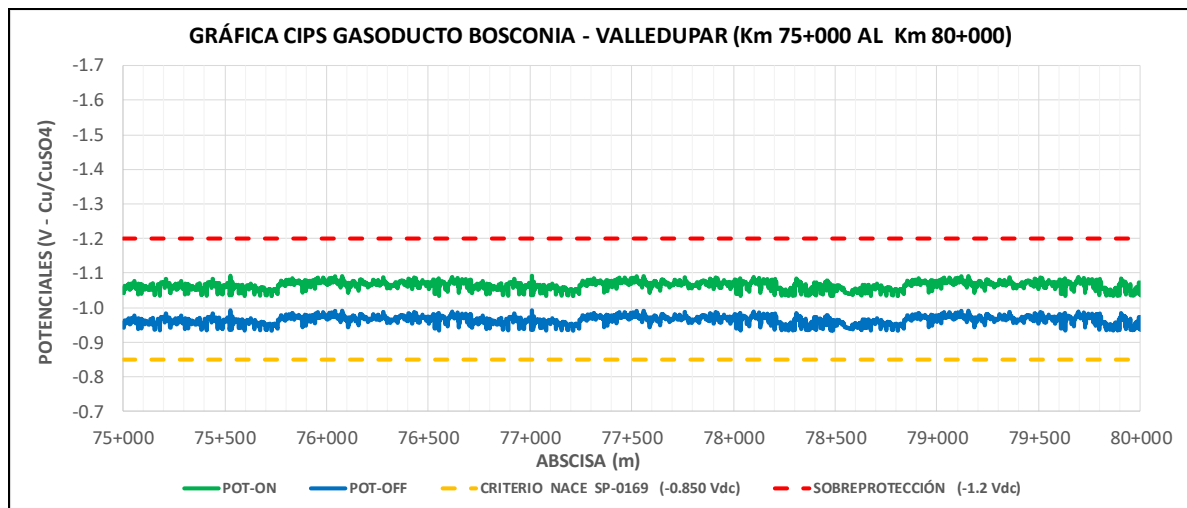
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 70+000 al km 75+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 50

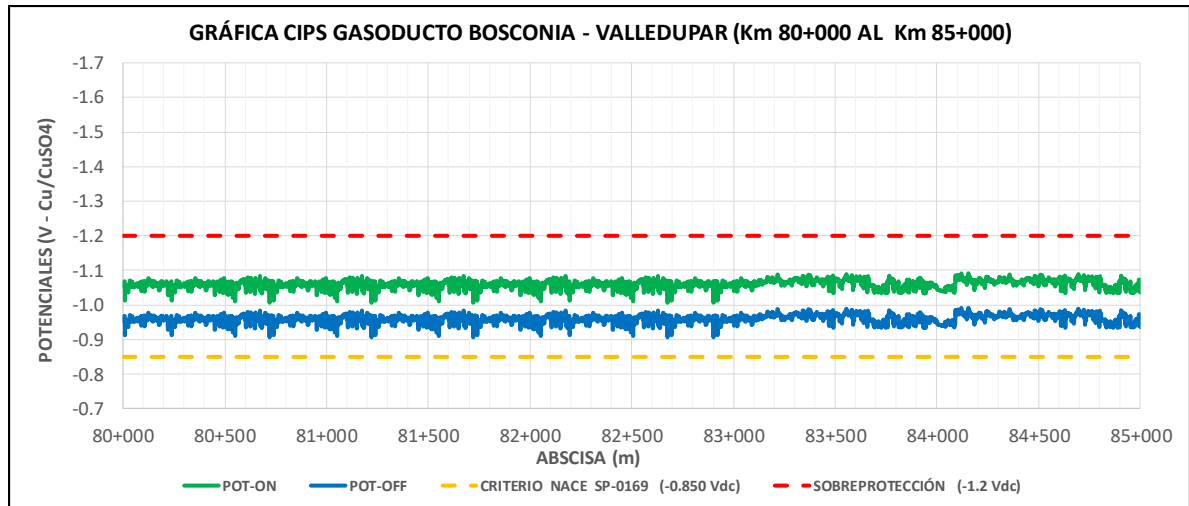
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 75+000 al km 80+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 51

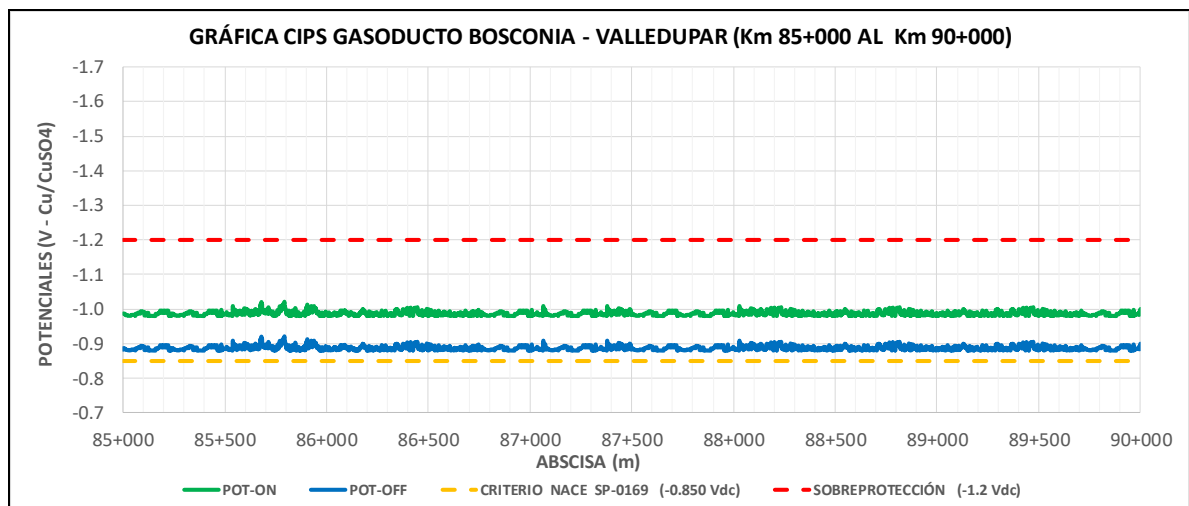
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 80+000 al km 85+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 52

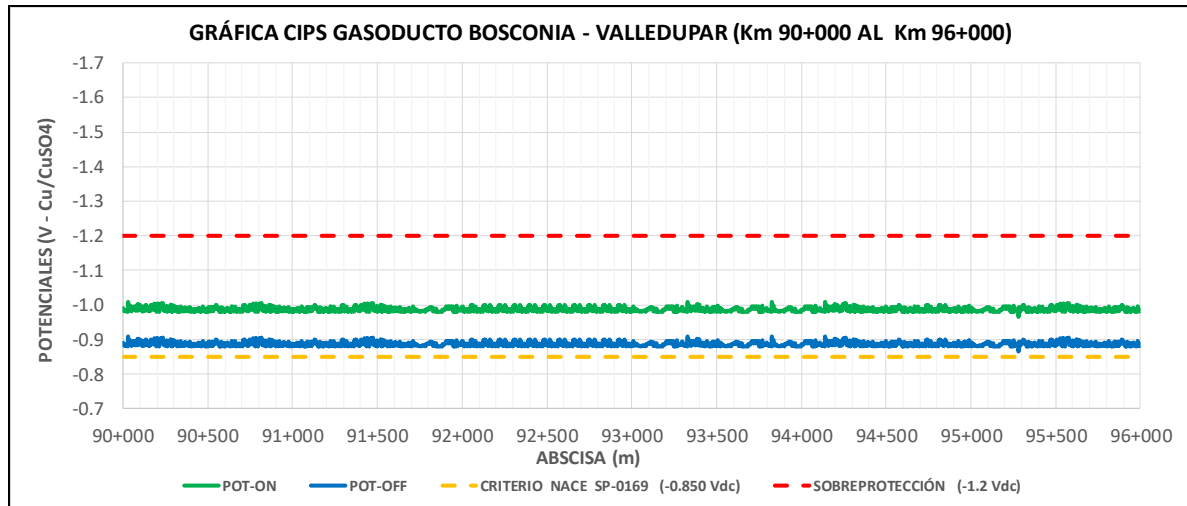
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 85+000 al km 90+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 53

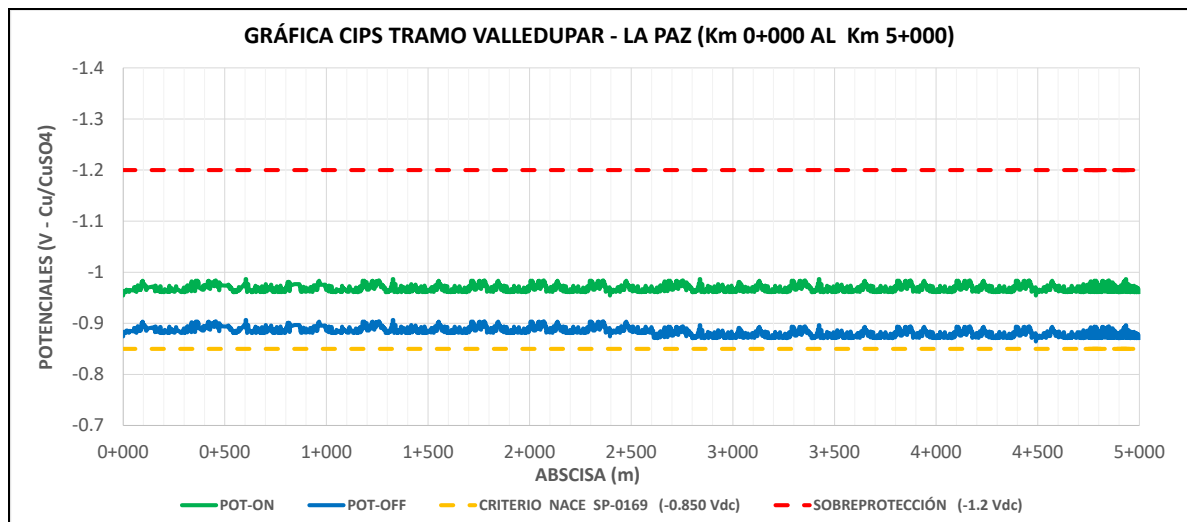
Grafica CIPS gasoducto Bosconia- Valledupar (Km 90+000 al km 96+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 54

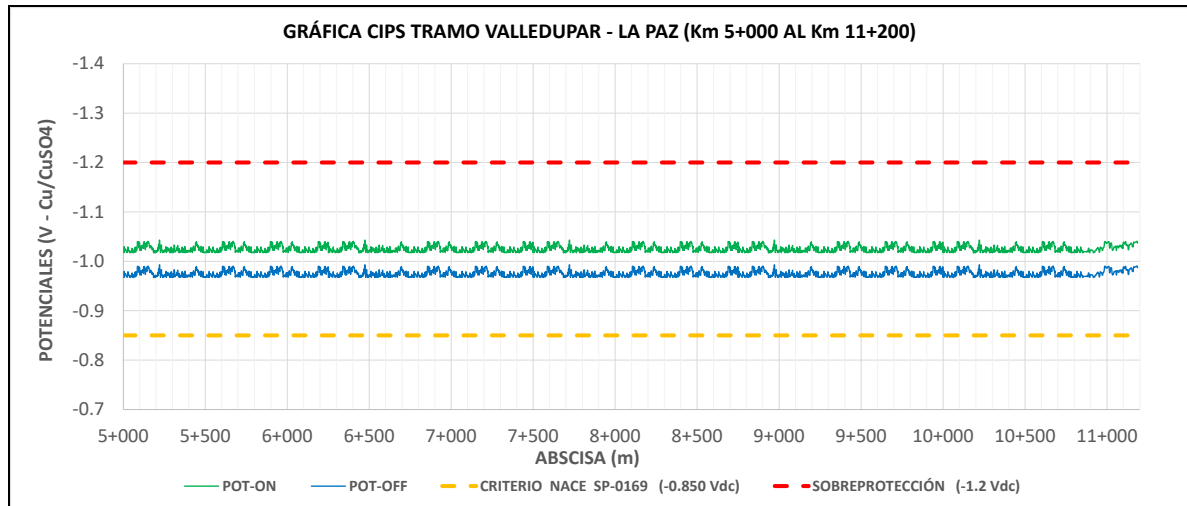
Grafica CIPS tramo Valledupar – La Paz (Km 0+000 al km 5+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Figura 55

Gráfica CIPS tramo Valledupar – La Paz (Km 5+000 al km 11+200)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

7.3.2 Resultados del CIPS gasoducto Bosconia – Tucurinca

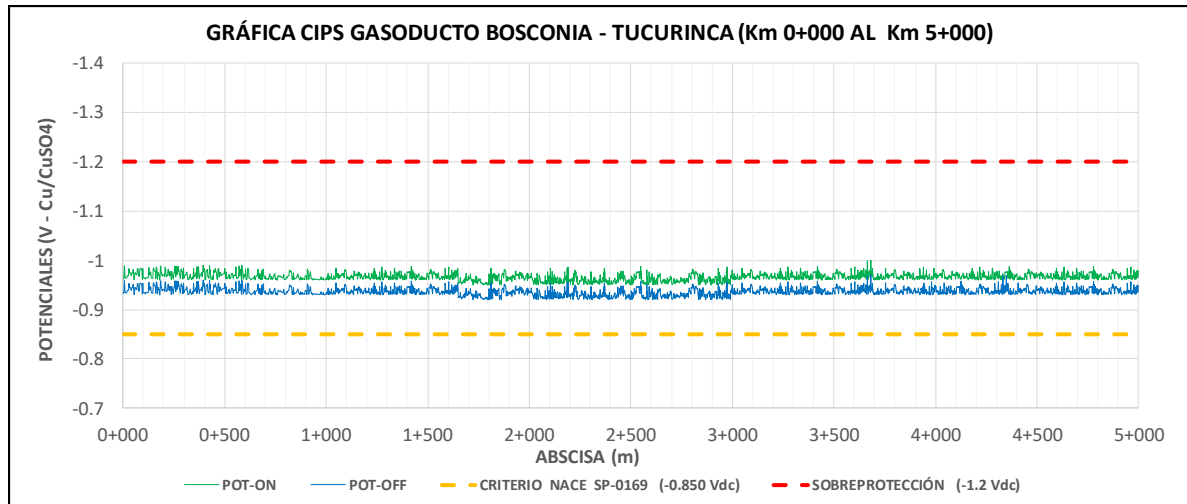
Con la realización de la toma de potencial paso a paso en el gasoducto Bosconia – Tucurinca se evidenció que cumple con el criterio NACE SP0169-2013 de los -850mV Vs un electrodo de referencia Cu/CuSO₄

Los valores de potenciales tubería-suelo registrados a lo largo del gasoducto son presentados en gráficas agrupadas en tramos de aproximadamente de 5Km.

No se pudo inspeccionar el tramo comprendido entre el Km 73+720 al Km 76+050 debido a la inundación del río Fundación.

Figura 56

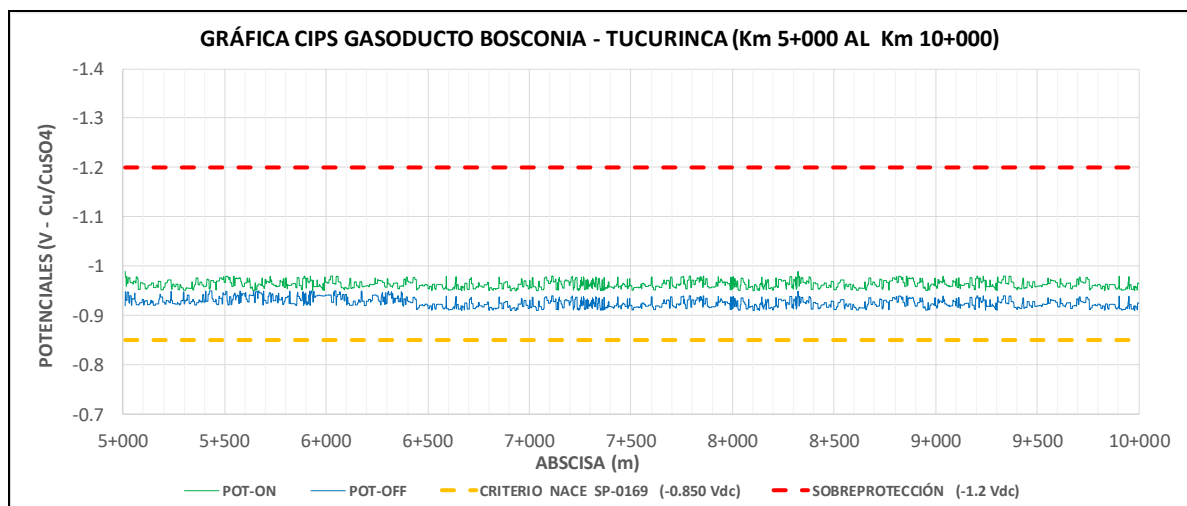
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 0+000 al Km 5+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 57

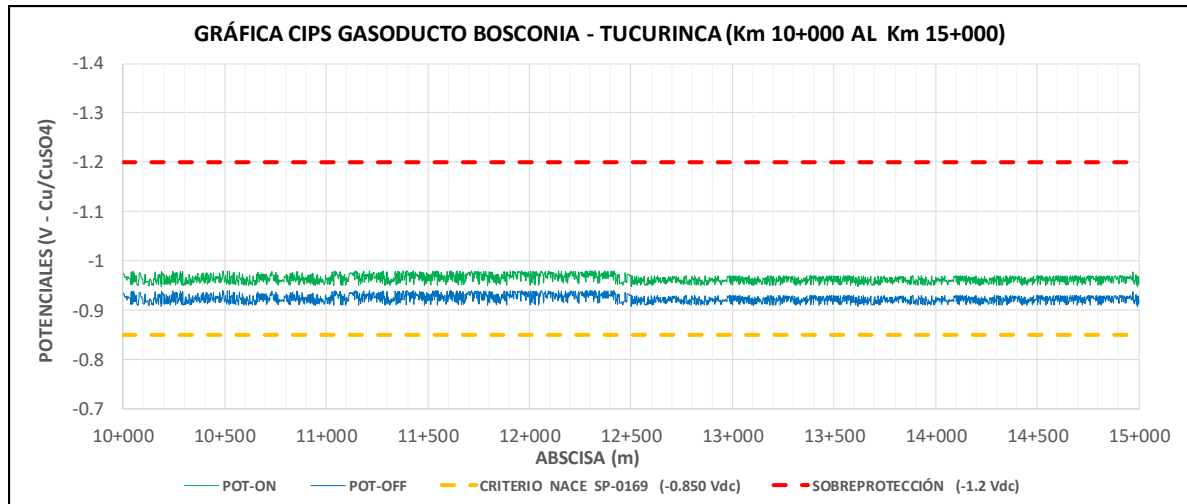
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 5+000 al Km 10+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 58

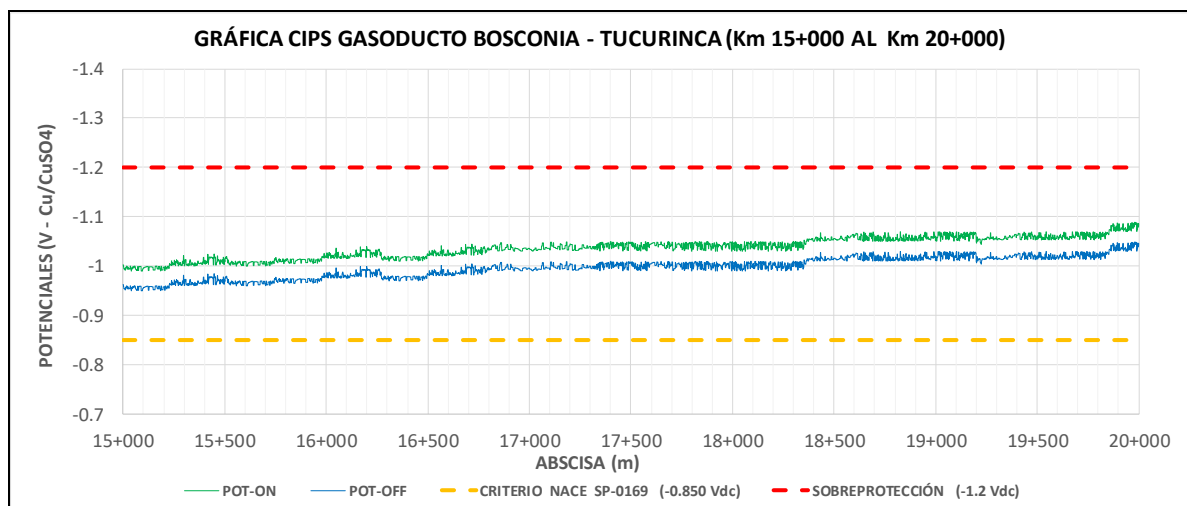
Gráfica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 10+000 al Km 15+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 59

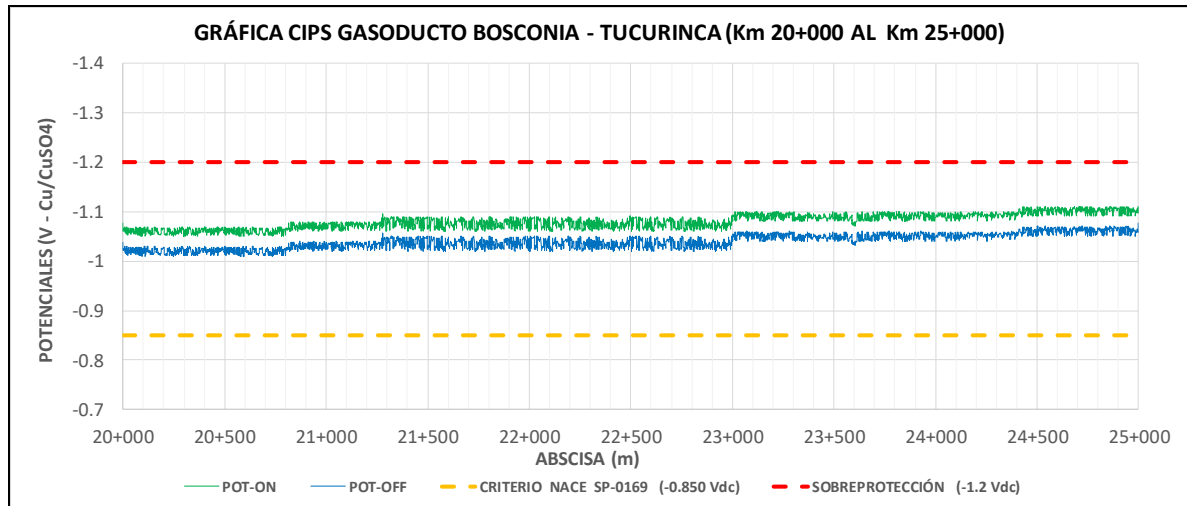
Gráfica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 15+000 al Km 20+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 60

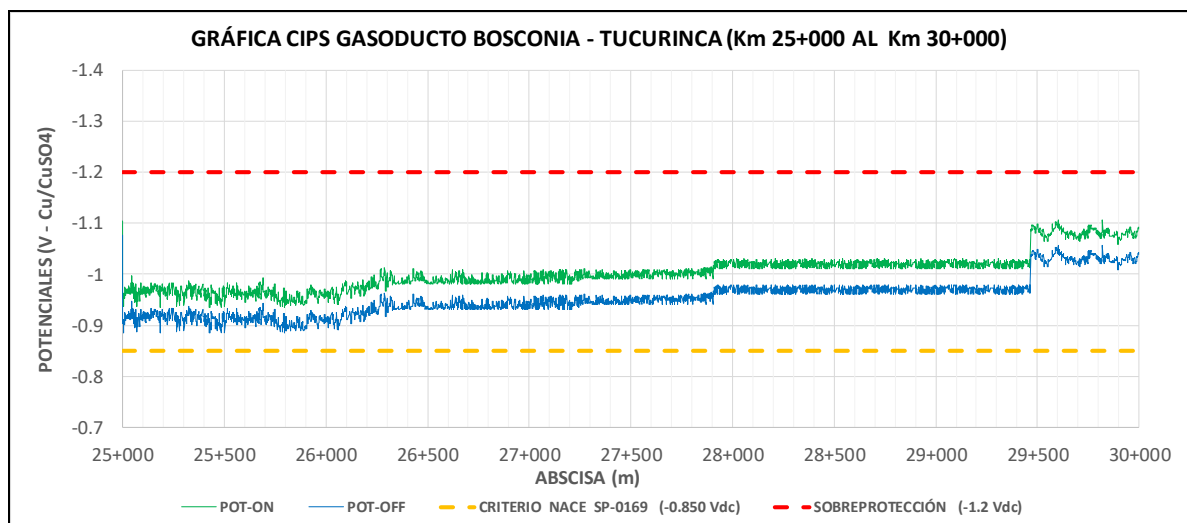
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 20+000 al Km 25+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 61

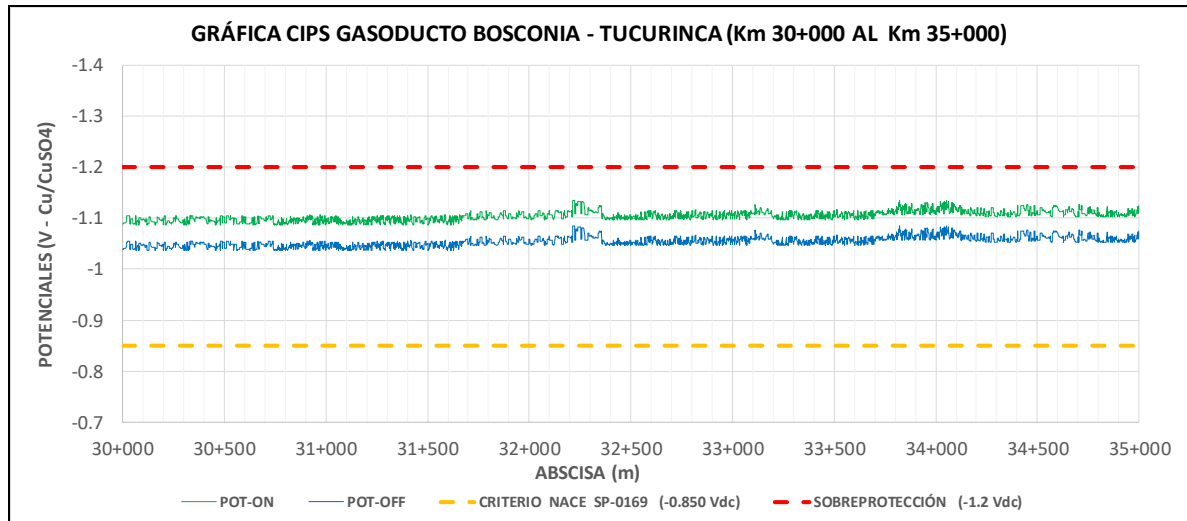
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 25+000 al Km 30+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 62

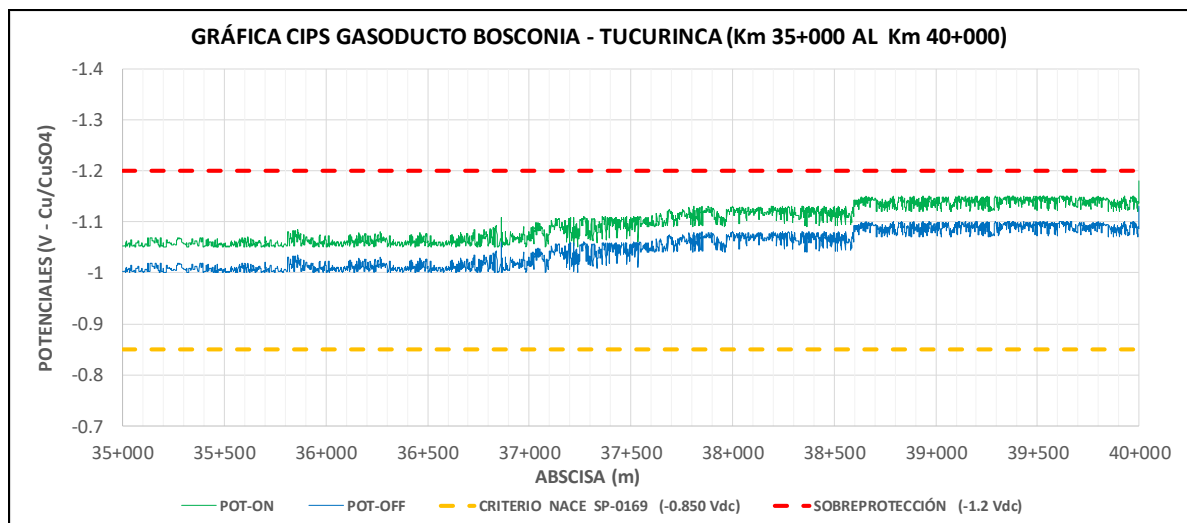
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 30+000 al Km 35+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 63

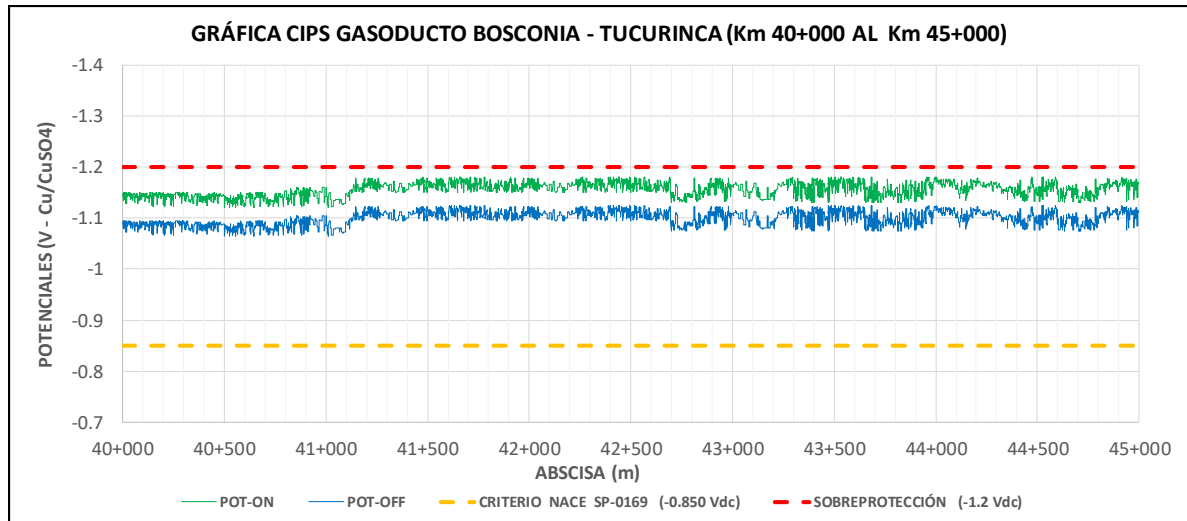
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 35+000 al Km 40+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 64

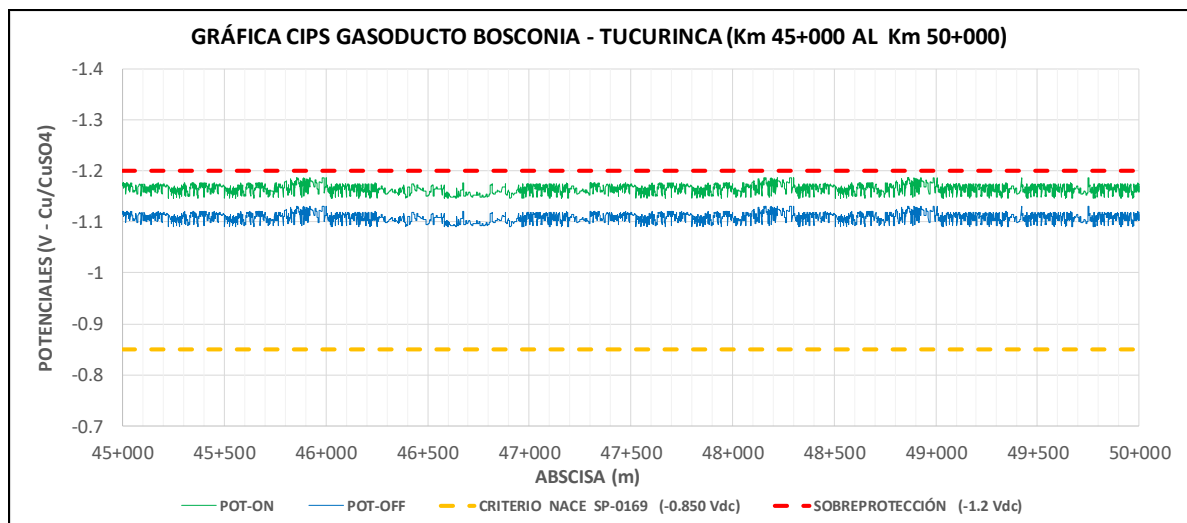
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 40+000 al Km 45+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 65

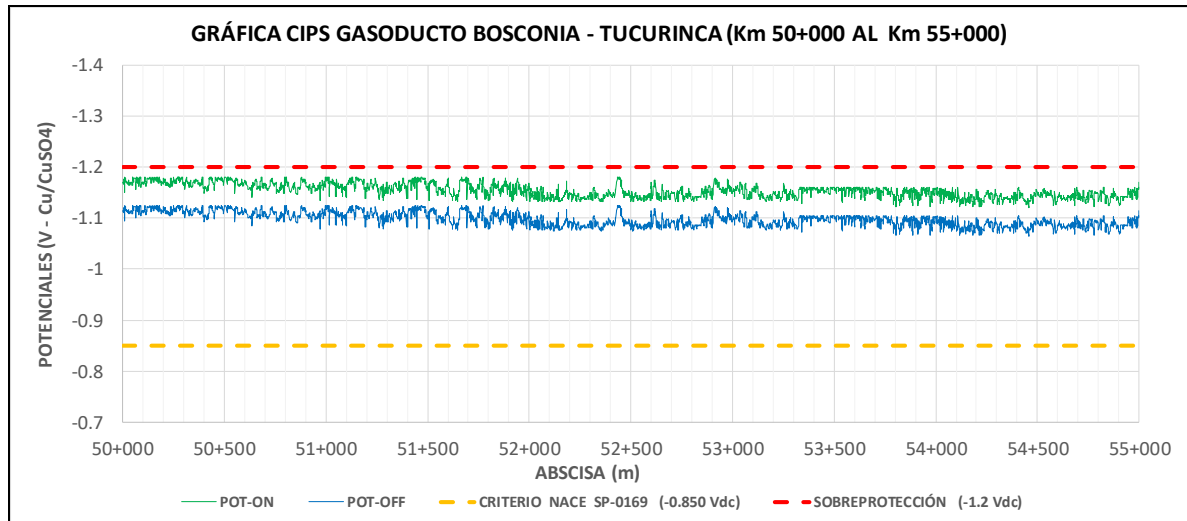
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 45+000 al Km 50+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 66

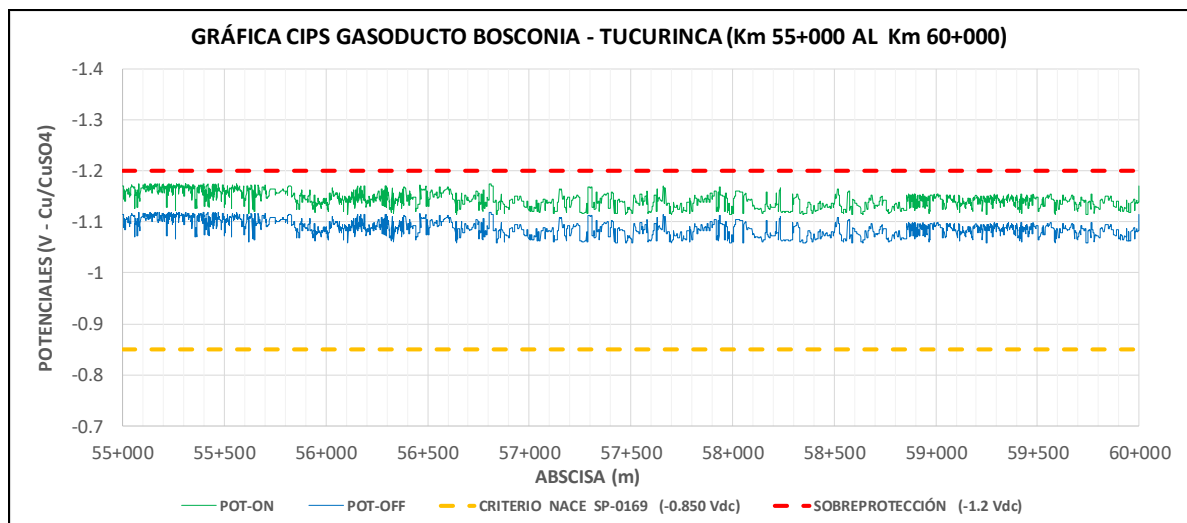
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 50+000 al Km 55+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 67

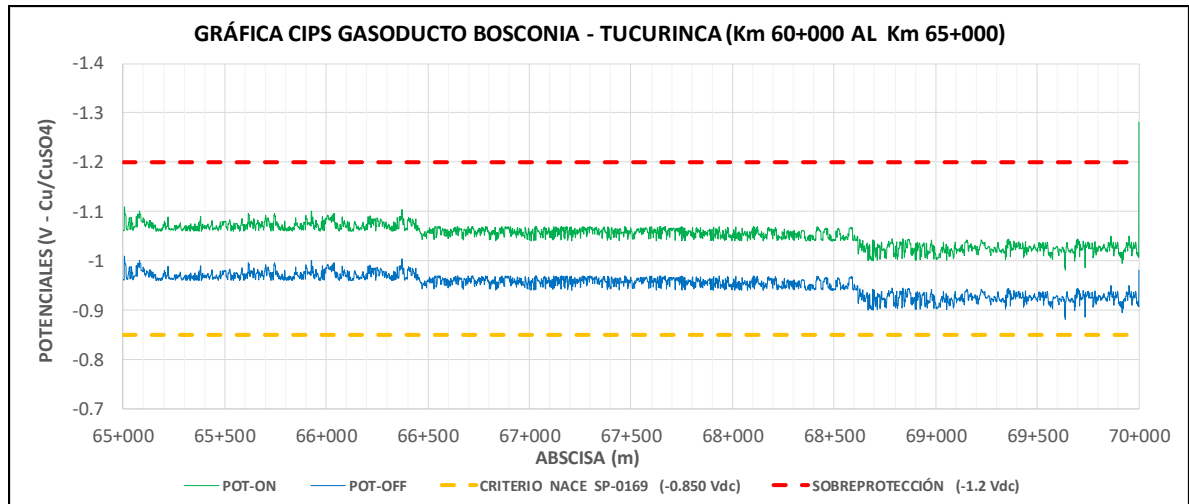
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 55+000 al Km 60+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 68

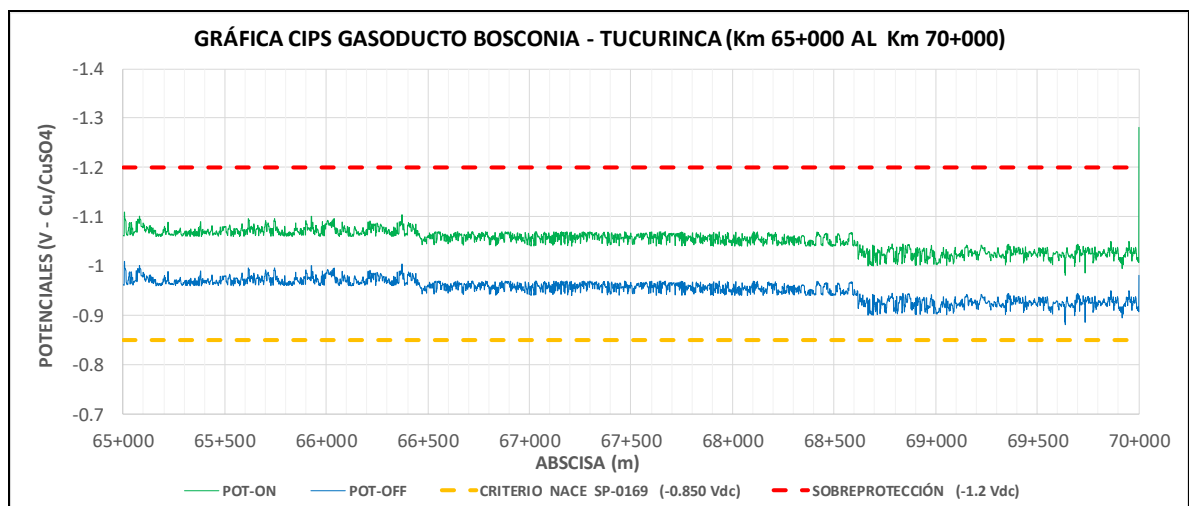
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 60+000 al Km 65+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 69

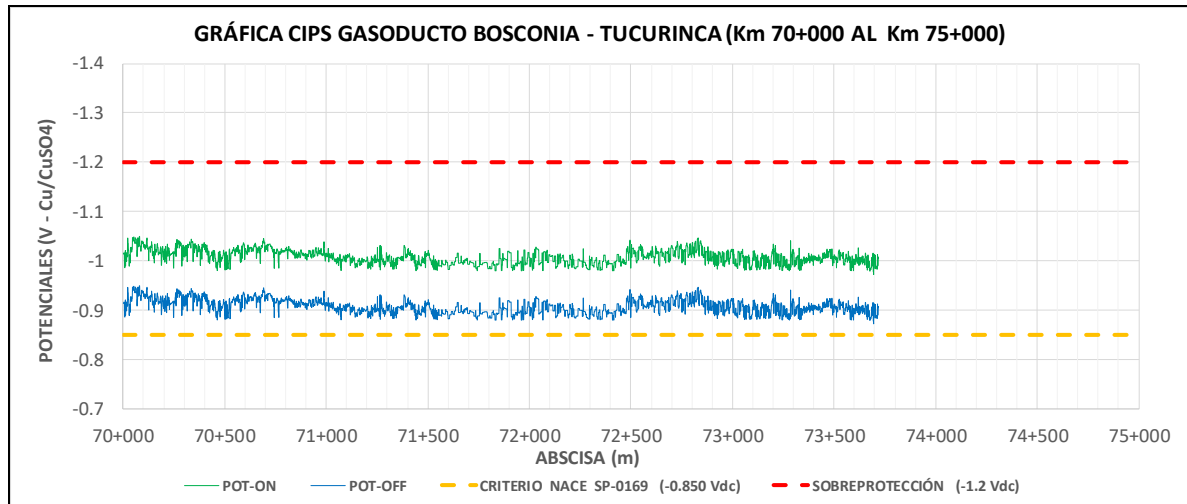
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 65+000 al Km 70+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 70

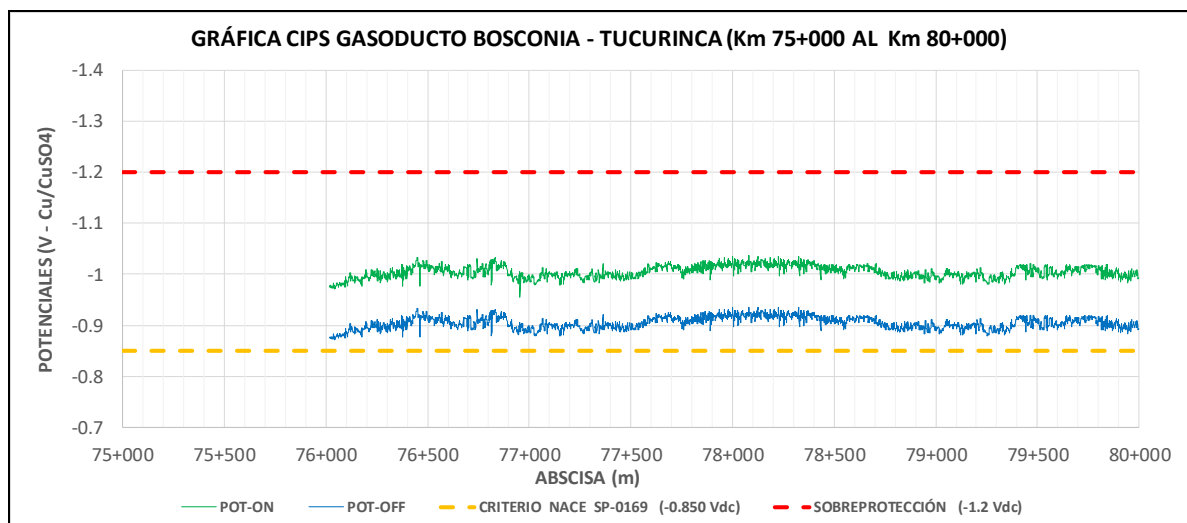
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 70+000 al Km 75+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 71

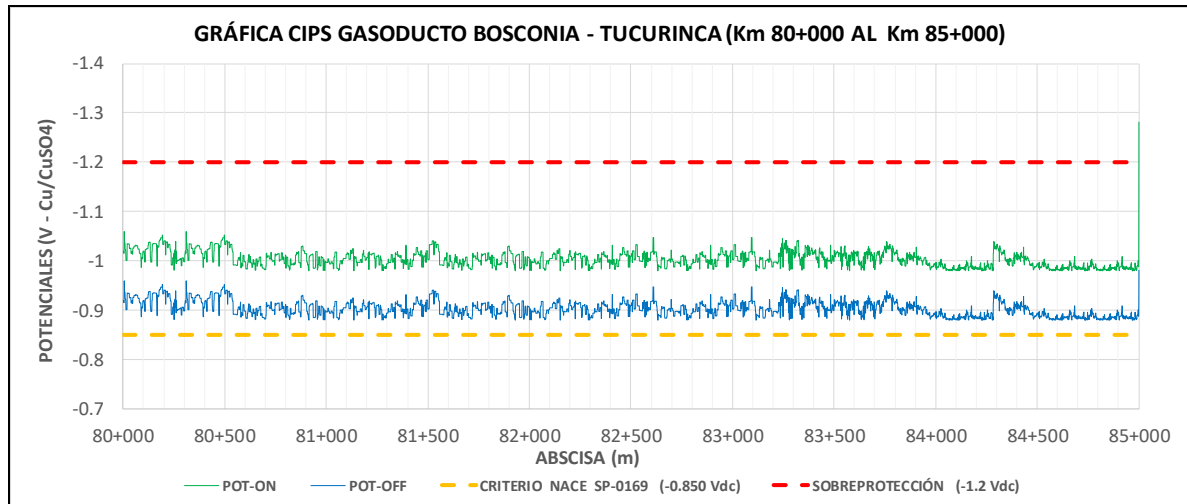
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 75+000 al Km 80+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 72

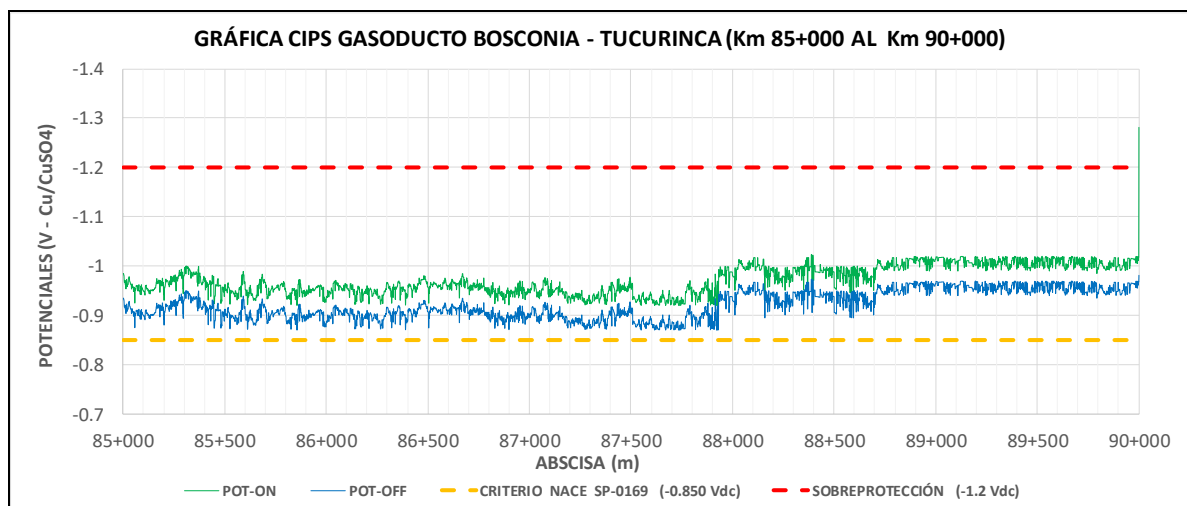
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 80+000 al Km 85+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 73

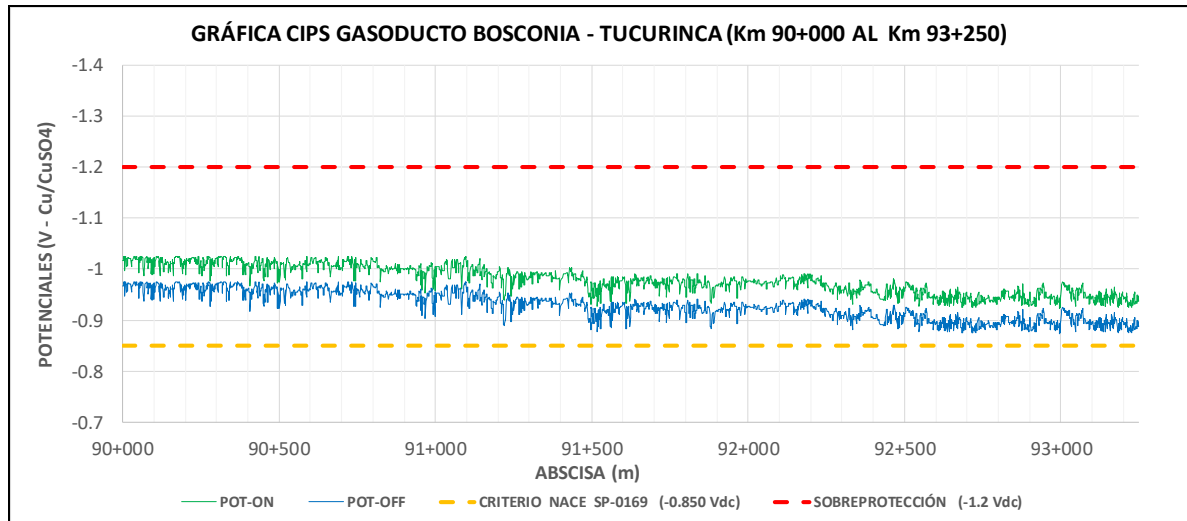
Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 85+000 al Km 90+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 74

Grafica CIPS gasoducto Bosconia-Tucurinca (Km 90+000 al Km 95+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

7.3.3 Resultados del CIPS gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia – Cuatro Vientos

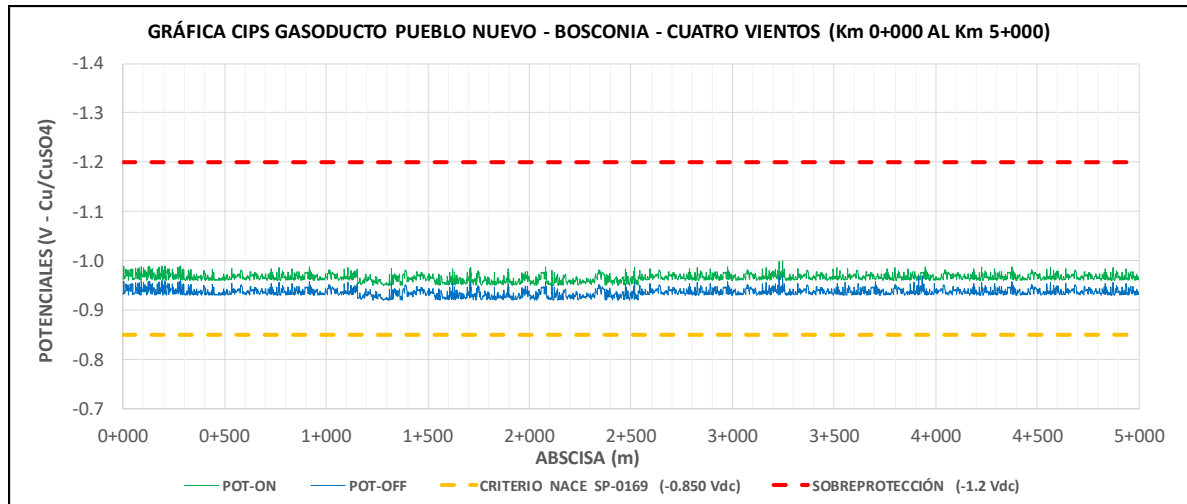
Con la realización de la toma de potencial paso a paso en el gasoducto Pueblo Nuevo - Bosconia - Cuatro Vientos se evidenció que cumple con el criterio NACE SP0169-2013 de los - 850mV Vs un electrodo de referencia Cu/CuSO₄

Los valores de potenciales tubería-suelo registrados a lo largo del gasoducto son presentados en gráficas agrupadas en tramos de aproximadamente de 5Km.

No se pudo inspeccionar el tramo comprendido entre el Km 19+600 al Km 21+700 debido a la inundación del río Ariguani.

Figura 75

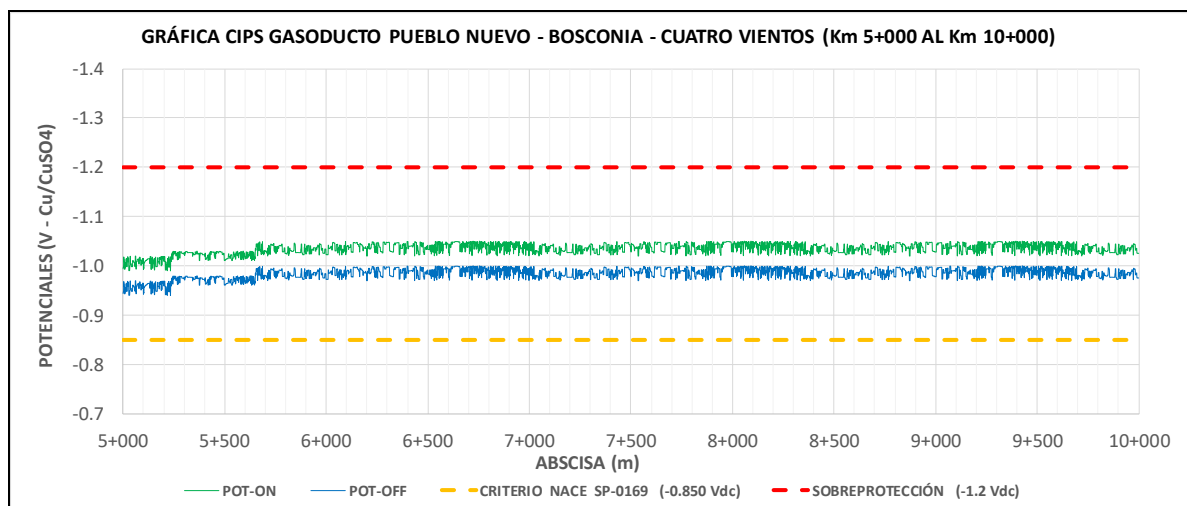
Grafica CIPS Gasoducto Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 0+000 al Km 5+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 76

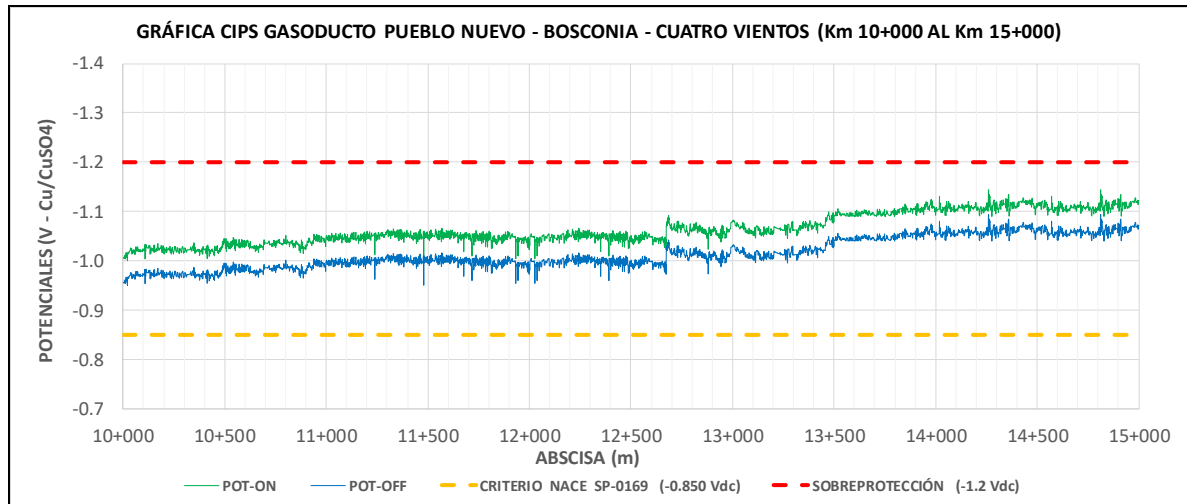
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 5+000 al Km 10+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 77

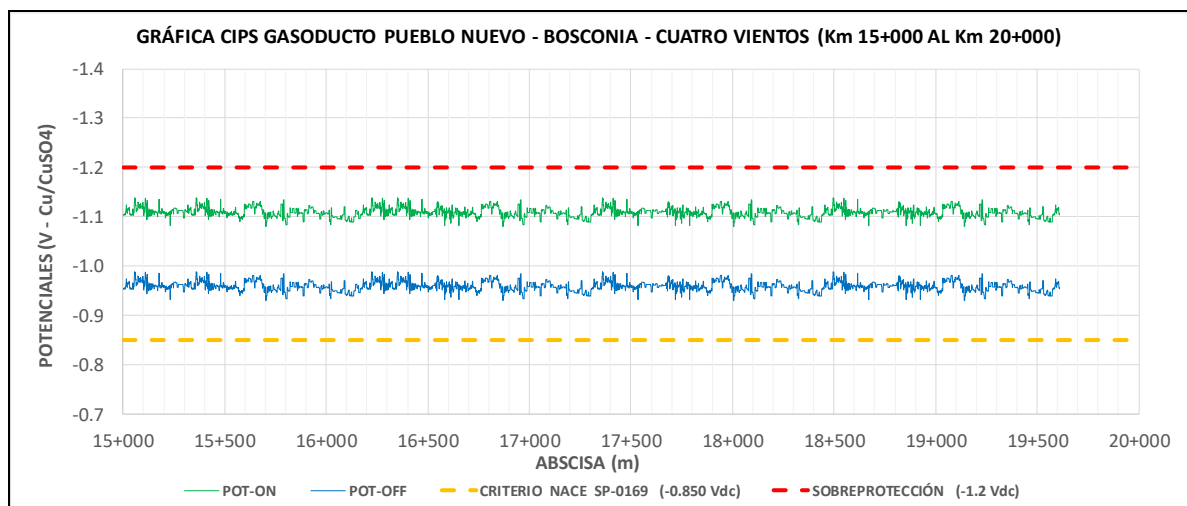
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 10+000 al Km 15+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 78

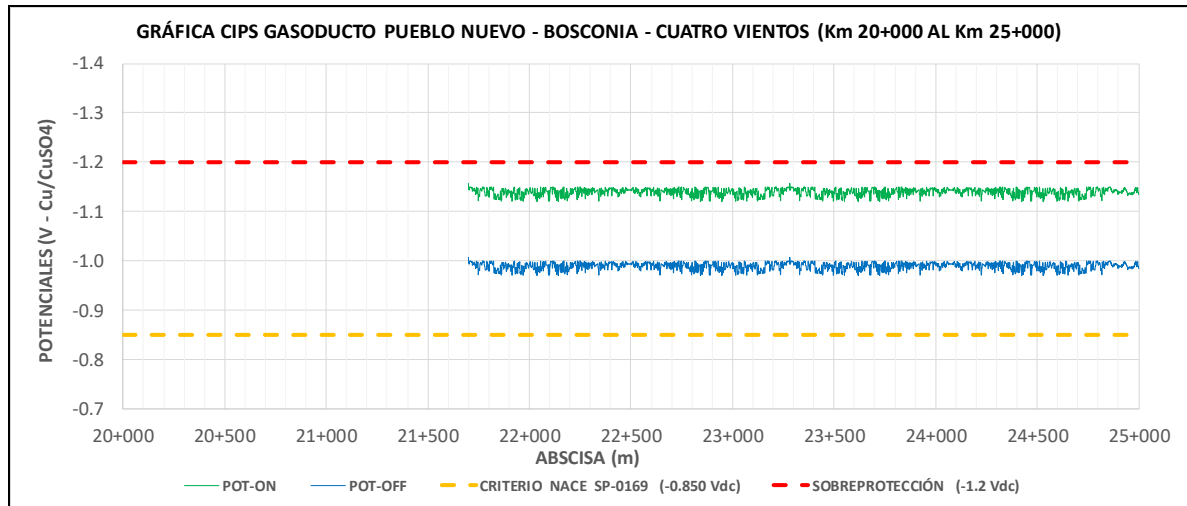
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 15+000 al Km 20+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 79

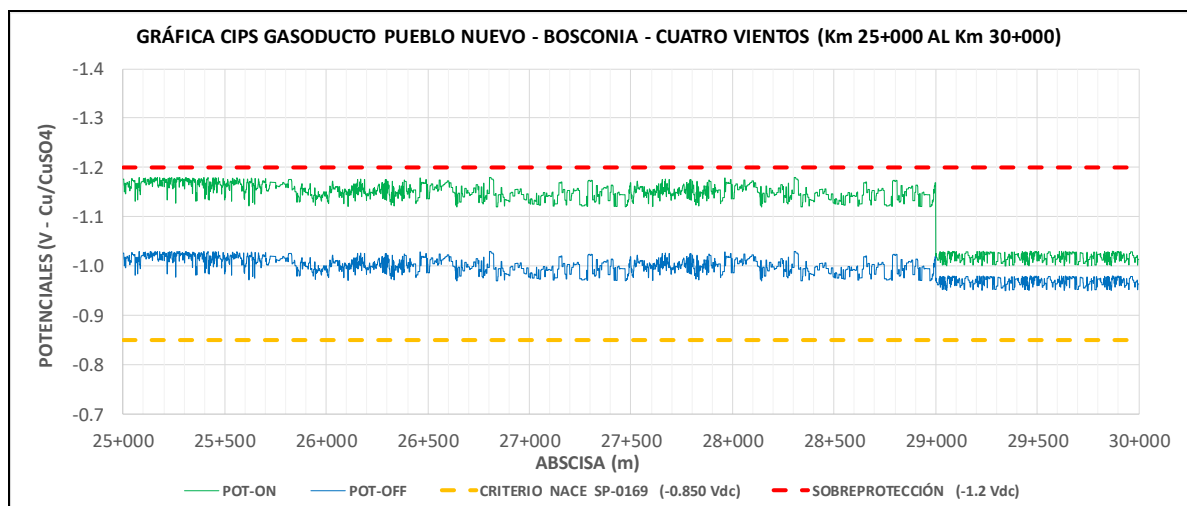
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 20+000 al Km 25+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 80

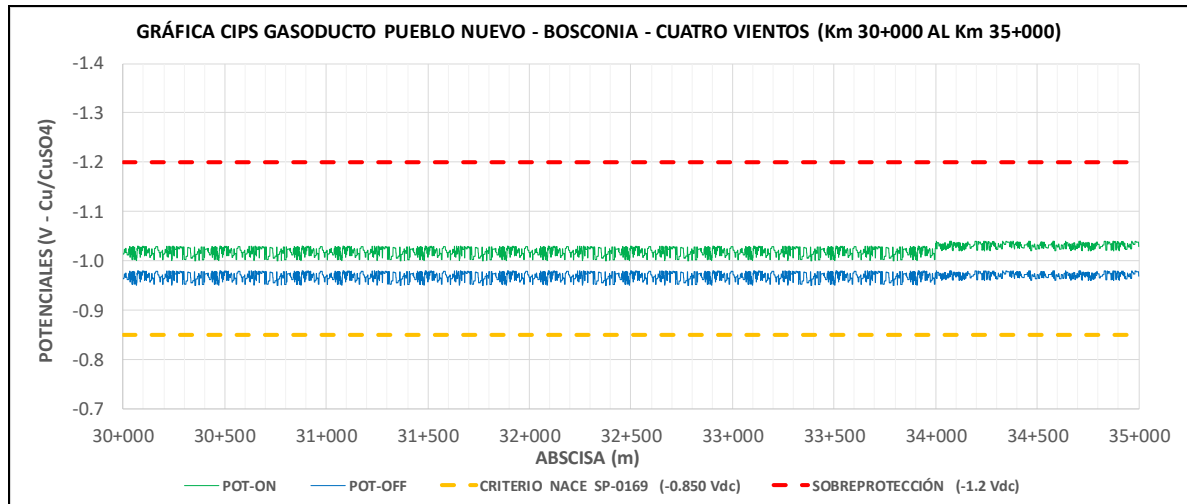
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 25+000 al Km 30+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 81

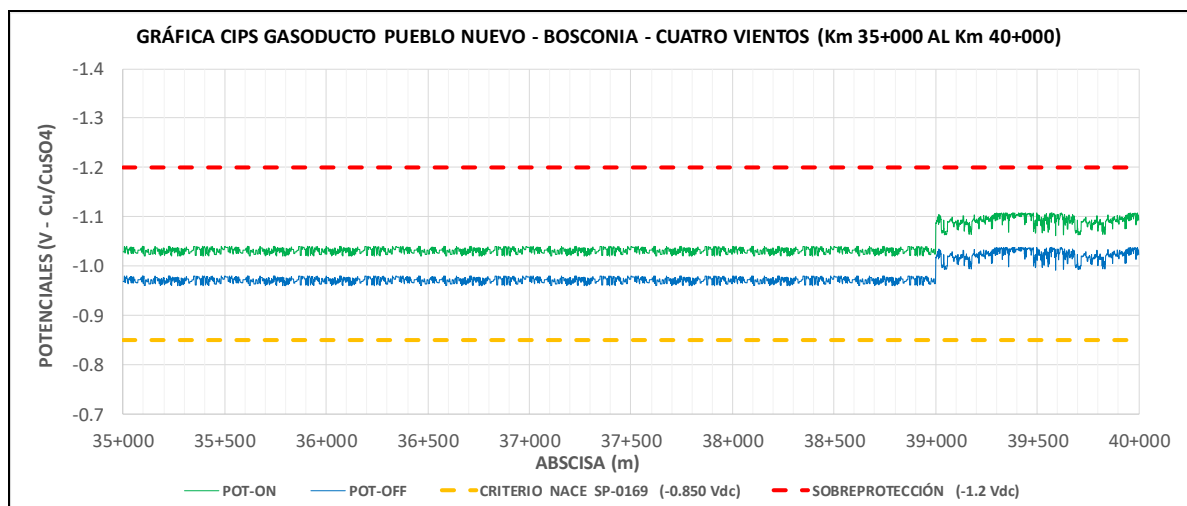
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 30+000 al Km 35+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 82

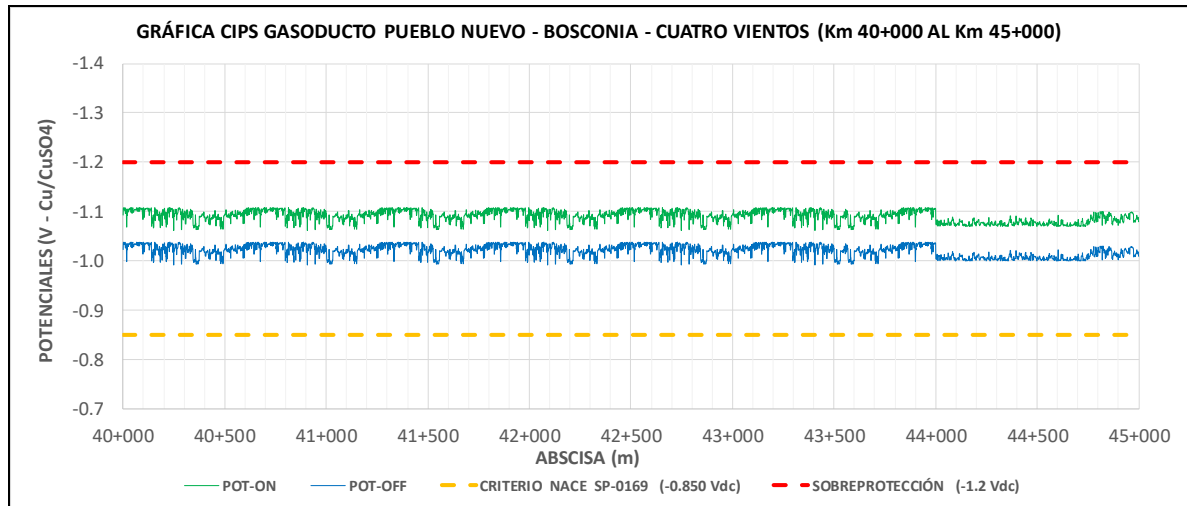
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 35+000 al Km 40+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 83

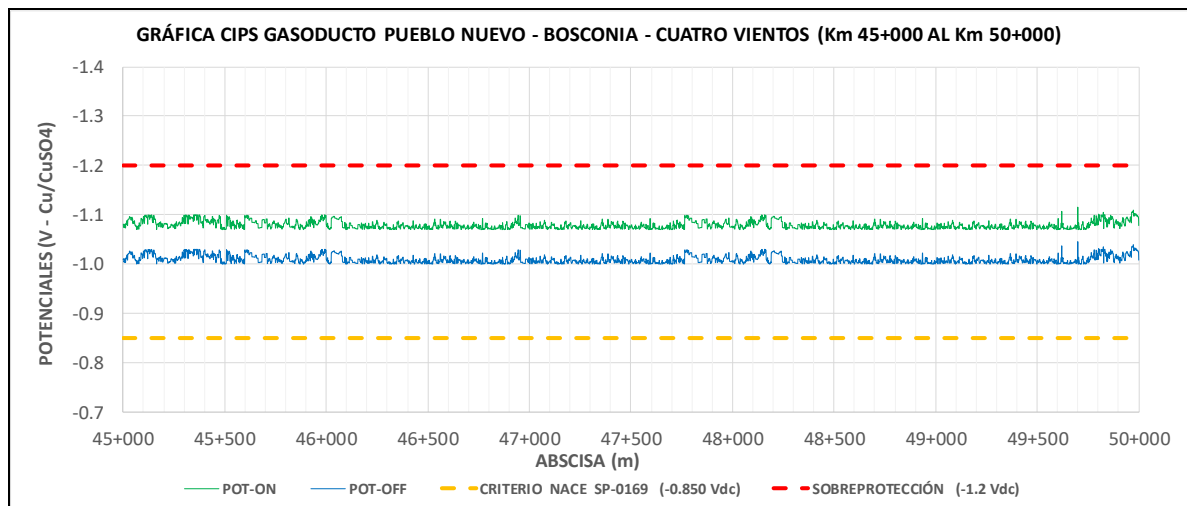
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 40+000 al Km 45+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 84

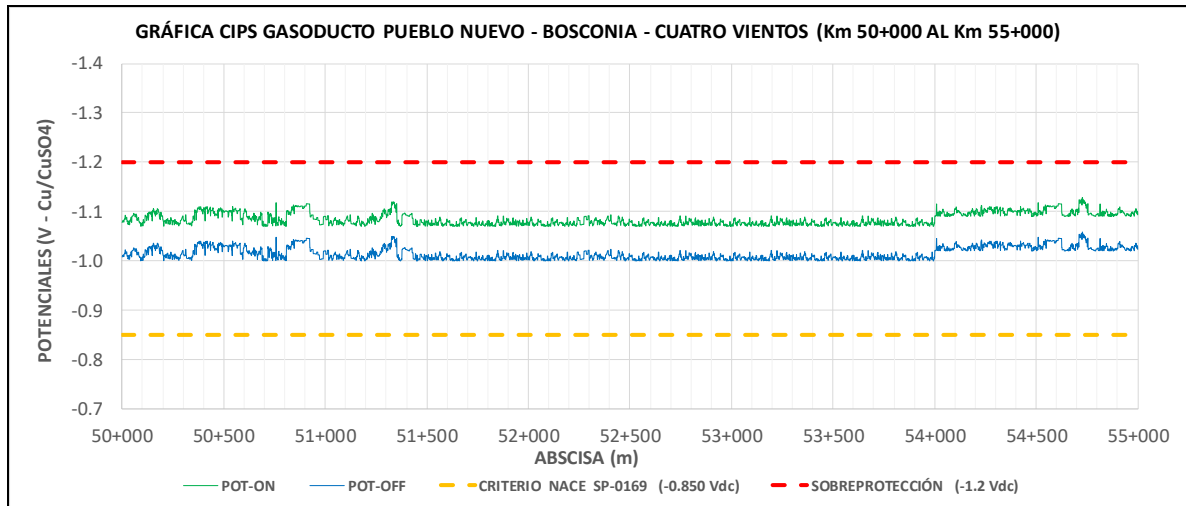
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 45+000 al Km 50+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 85

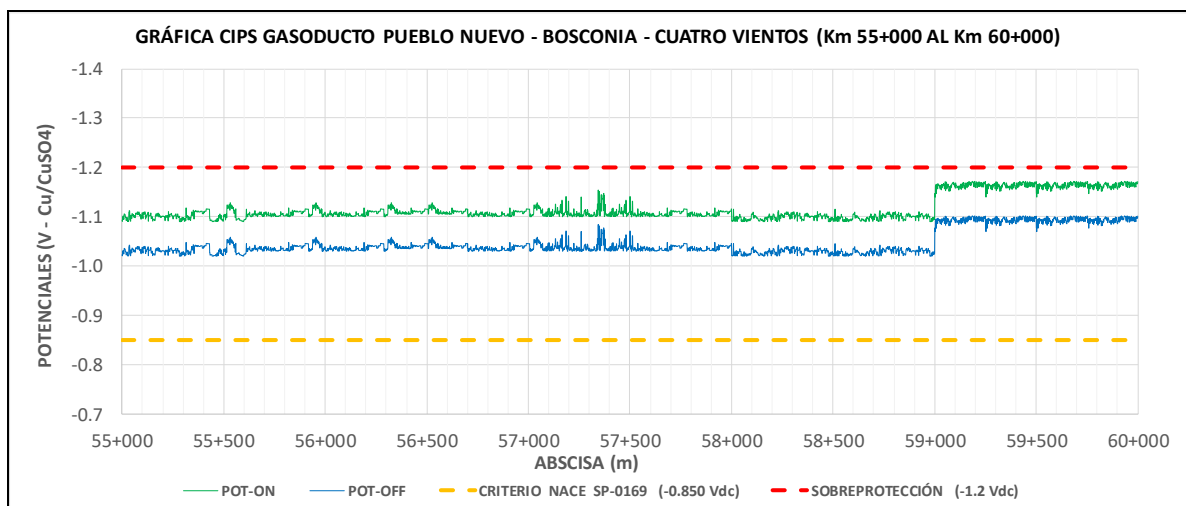
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 50+000 al Km 55+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 86

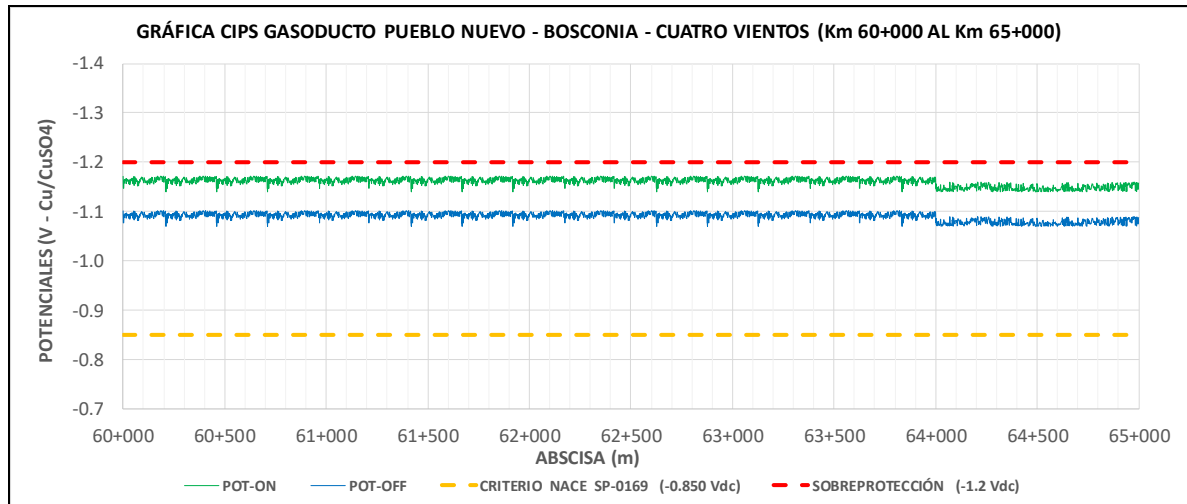
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 55+000 al Km 60+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 87

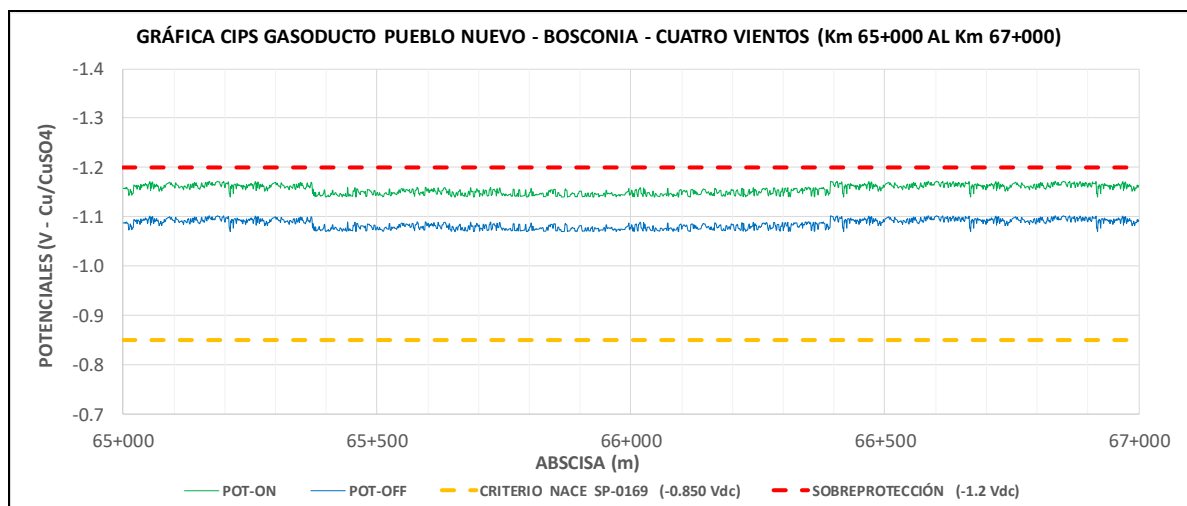
Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 60+000 al Km 65+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

Figura 88

Grafica CIPS Pueblo Nuevo-Bosconia-Cuatro Vientos (Km 65+000 al Km 67+000)



Nota: (Área de integridad Gases del Caribe S.A. E.S.P)

8. Comparativo de Costos del Sistemas de Protección Catódica con Rectificador AC/DC Alimentado con Energía Eléctrica Convencional Inicialmente Instalado Versus el Nuevo Sistema de Protección Catódica con Tarjeta Inyectora de Corriente Alimentada con Energía Solar Fotovoltaica

Se hace un comparativo referente a los costos de construcción e instalación, operación y mantenimiento del sistema de protección catódica inicialmente instalado en la red de gasoductos de interconexión Magdalena – Cesar versus el nuevo sistema de protección catódica puesto en servicio.

El análisis solo contempla los equipos rectificadores y conexiones a las fuentes de energía eléctrica, puesto que las camas anódicas inicialmente instaladas cumplen a cabalidad con los parámetros de diseños, por lo tanto, independientemente de cual equipo se utilice para inyectar la corriente al sistema, se tenían que construir con las mismas especificaciones, por esta razón se excluyen los costos de las camas anódicas.

8.1. Comparativo de Costos en la Construcción e Instalación

En las siguientes tablas se muestran los costos asociados a la construcción e instalación de las unidades inyectoras de corriente en ambos sistemas de protección catódica:

Todos valores son antes de IVA

Tabla 27

Costos de la construcción e instalación del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Valledupar

COSTOS DE LA CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO XARTU/1-CP PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO BOSCONIA VALLEDUPAR				
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR SUBTOTAL	
PANEL SOLAR 150W	2	\$ 750,000	\$	1,500,000
BATERÍA 12V - 33A	8	\$ 182,617	\$	1,460,933
REGULADOR DE CARGA 30A - 12V	1	\$ 250,000	\$	250,000
EQUIPO RECTIFICADOR XARTU/1-CP	1	\$ 21,047,060	\$	21,047,060
INSTALACIÓN EQUIPO RECTIFICADOR	1	\$ 4,640,000	\$	4,640,000
ESTRUCTURA SOPORTE PANELES SOLARES	1	\$ 1,243,000	\$	1,243,000
CABLEADO Y CONSUMIBLES	1	\$ 1,500,000	\$	1,500,000
EQUIPO WILOG-CP	3	\$ 3,710,417	\$	11,131,250
TOTAL			\$	42,772,243

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.) Estos valores son referencia del año 2018

Tabla 28

Costos de la construcción e instalación del rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Valledupar

COSTOS DE LA CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL RECTIFICADOR AC/DC PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO BOSCONIA VALLEDUPAR			
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR SUBTOTAL
RECTIFICADOR AC/DC 60V 5A (0.534KVA) VOLTAJE DE ENTRADA = 110VAC	1	\$16,478,744	\$ 16,478,744
OBRAS CIVILES Y ELECTRICAS PARA INSTALACION SPC	1	\$ 9,895,000	\$ 9,895,000
DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA	1	\$ 7,500,000	\$ 7,500,000
INSTALACIÓN EQUIPO RECTIFICADOR + CONSUMIBLES	1	\$ 7,009,365	\$ 7,009,365
EQUIPO RESPALDO UPS 15KVA	1	\$13,200,000	\$ 13,200,000
CONSTRUCCIÓN INFRAESTUCTURA ELECTRICA	1	\$36,750,000	\$ 36,750,000
TOTAL			\$ 90,833,109

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.) Estos valores son referencia del año 2015. La construcción infraestructura eléctrica hace referencia conexión a la red de 13200V_{AC} a una distancia de 800m, incluye cables, postes, transformador 5KVA monofásico y mano de obra.

Tabla 29

Costos de la construcción e instalación del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Tucurinca

COSTOS DE LA CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO XARTU/1-CP PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO BOSCONIA TUCURINCA			
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR SUBTOTAL
PANEL SOLAR 150W	2	\$ 750,000	\$ 1,500,000
BATERÍA 12V - 33A	8	\$ 182,617	\$ 1,460,933
REGULADOR DE CARGA 30A - 12V	1	\$ 250,000	\$ 250,000
EQUIPO RECTIFICADOR XARTU/1-CP	1	\$ 21,047,060	\$ 21,047,060
INSTALACIÓN EQUIPO RECTIFICADOR	1	\$ 4,640,000	\$ 4,640,000
ESTRUCTURA SOPORTE PANELES SOLARES	1	\$ 1,243,000	\$ 1,243,000
CABLEADO Y CONSUMIBLES	1	\$ 1,500,000	\$ 1,500,000
EQUIPO WILOG-CP	2	\$ 3,710,417	\$ 7,420,833
TOTAL			\$ 39,061,826

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.) Estos valores son referencia del año 2018

Tabla 30

Costos de la construcción e instalación del rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Tucurinca

COSTOS DE LA CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL RECTIFICADOR AC/DC PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO BOSCONIA TUCURINCA			
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	CANTIDAD	VALOR	VALOR
RECTIFICADOR AC/DC 60V 10A (0.748KVA)	1	\$18,950,556	\$ 18,950,556
OBRAS CIVILES Y ELECTRICAS PARA INSTALACION SPC	1	\$ 9,895,000	\$ 9,895,000
DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA	1	\$ 6,750,422	\$ 6,750,422
INSTALACIÓN EQUIPO RECTIFICADOR + CONSUMIBLES	1	\$ 7,009,365	\$ 7,009,365
EQUIPO RESPALDO UPS 20KVA	1	\$15,700,000	\$ 15,700,000
CONSTRUCCIÓN INFRAESTUCTURA ELECTRICA	1	\$30,490,000	\$ 30,490,000
TOTAL			\$ 88,795,343

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.) Estos valores son referencia del año 2015. La construcción infraestructura eléctrica hace referencia conexión a la red de 13200V_{AC} a una distancia de 700m, incluye cables, postes, transformador 5KVA monofásico y mano de obra.

Tabla 31

Costos de la construcción e instalación del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Pueblo Nuevo Bosconia Cuatro Vientos

COSTOS DE LA CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO XARTU/1-CP PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO PUEBLO NUEVO BOSCONIA CUATRO VIENTOS			
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR SUBTOTAL
PANEL SOLAR 150W	2	\$ 750,000	\$ 1,500,000
BATERÍA 12V - 33A	8	\$ 182,617	\$ 1,460,933
REGULADOR DE CARGA 30A - 12V	1	\$ 250,000	\$ 250,000
EQUIPO RECTIFICADOR XARTU/1-CP	1	\$ 21,047,060	\$ 21,047,060
INSTALACIÓN EQUIPO RECTIFICADOR	1	\$ 4,640,000	\$ 4,640,000
ESTRUCTURA SOPORTE PANELES SOLARES	1	\$ 1,243,000	\$ 1,243,000
CABLEADO Y CONSUMIBLES	1	\$ 1,500,000	\$ 1,500,000
EQUIPO WILOG-CP	2	\$ 3,710,417	\$ 7,420,833
TOTAL			\$ 39,061,826

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.) Estos valores son referencia del año 2018

Tabla 32

Costos de la construcción e instalación del rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Pueblo Nuevo Bosconia Cuatro Vientos

COSTOS DE LA CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL RECTIFICADOR AC/DC PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO PUEBLO NUEVO BOSCONIA CUATRO VIENTOS			
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR SUBTOTAL
RECTIFICADOR AC/DC 60V 10A (0.748KVA) VOLTAJE DE ENTRADA = 110VAC	1	\$ 18,950,556	\$ 18,950,556
OBRAS CIVILES Y ELECTRICAS PARA INSTALACION SPC	1	\$ 9,895,000	\$ 9,895,000
DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA	1	\$ 6,750,422	\$ 6,750,422
INSTALACIÓN EQUIPO RECTIFICADOR + CONSUMIBLES	1	\$ 7,009,365	\$ 7,009,365
EQUIPO RESPALDO UPS 20KVA	1	\$ 15,700,000	\$ 15,700,000
CONSTRUCCIÓN INFRAESTUCTURA ELECTRICA	1	\$ 24,232,000	\$ 24,232,000
TOTAL			\$ 82,537,343

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.) Estos valores son referencia del año 2015. La construcción infraestructura eléctrica hace referencia conexión a la red

de 13200V_{AC} a una distancia de 500m, incluye cables, postes, transformador 5KVA monofásico y mano de obra.

Tabla 33

Resumen comparativo de costos construcción e instalación del equipo XARTU/1-CP versus la unidad rectificadora AC/DC

COMPARATIVO DE COSTOS EN LA CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO XARTU1-CP VERSUS LA UNIDAD RECTIFICADORA AC/DC		
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA	EQUIPO XARTU/1-CP	RECTIFICADOR AC/DC
GASODUCTO BOSCONIA VALLEDUPAR	\$ 42,772,243	\$ 90,833,109
GASODUCTO BOSCONIA TUCURINCA	\$ 39,061,826	\$ 88,795,343
GASODUCTO PUEBLO NUEVO BOSCONIA CUATRO VIENTOS	\$ 39,061,826	\$ 82,537,343
AJUSTE IPC (AÑOS 2016, 2017 Y 2018)	-	\$ 35,590,489
TOTAL	\$ 120,895,896	\$ 297,756,283
DIFERENCIA	\$	176,860,388
PORCENTAJE DIFERENCIA		146.29%
RELACIÓN		1 : 2,4629

Nota: (Autor,2021), para hacer un análisis más acorde se realiza un ajuste de IPC (índice de precios al consumidor) al valor total de la construcción del año 2015, los IPC reportados por la DIAN en los años 2016, 2017 y 2018 son 5.75%, 4.09% y 3.18%

8.2. Comparativo de Costos en la Operación y Mantenimiento

En las siguientes tablas se muestran los costos asociados a la operación y mantenimiento en ambos sistemas de protección catódica:

Tabla 34

Costos de operación y mantenimiento del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Valledupar

COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO XARTU/1-CP PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO BOSCONIA VALLEDUPAR	
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	VALOR SUBTOTAL/AÑO
INSPECCIÓN PREVENTIVA EQUIPO XARTU/1-CP	\$ 1,640,000
CIPS	\$ 28,015,564
TOMA DE POTENCIAL POSTE A POSTE	\$ 18,677,043
TOTAL AÑO	\$ 48,332,607

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.) en la actividad CIPS se cambia la periodicidad a 2 años y se implementa la actividad de toma de potenciales poste a poste como medida de aseguramiento.

Tabla 35

Costos de operación y mantenimiento del rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Valledupar

COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL RECTIFICADOR AC/DC PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO BOSCONIA VALLEDUPAR	
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	VALOR SUBTOTAL/AÑO
PROMEDIO DE PAGO RECIBOS DE ELECTRICIDAD	\$ 1,924,560
INSPECCIÓN PREVENTIVA RECTIFICADOR AC/DC	\$ 1,640,000
INSPECCIÓN DE POTENCIAL EN PUNTOS DE MONITOREO	\$ 1,640,000
CIPS	\$ 56,031,128
TOTAL AÑO	\$ 61,235,688

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Tabla 36

Costos de operación y mantenimiento del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Tucurinca

COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO XARTU/1-CP PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO BOSCONIA TUCURINCA	
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	VALOR SUBTOTAL/AÑO
INSPECCIÓN PREVENTIVA EQUIPO XARTU/1-CP	\$ 1,640,000
CIPS	\$ 27,431,907
TOMA DE POTENCIAL POSTE A POSTE	\$ 18,287,938
TOTAL AÑO	\$ 47,359,844

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Tabla 37

Costos de operación y mantenimiento del equipo rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Bosconia Tucurinca

COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL RECTIFICADOR AC/DC PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO BOSCONIA TUCURINCA	
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	VALOR SUBTOTAL/AÑO
PROMEDIO DE PAGO RECIBOS DE ELECTRICIDAD	\$ 2,480,460
INSPECCIÓN PREVENTIVA RECTIFICADOR AC/DC	\$ 1,640,000
INSPECCIÓN DE POTENCIAL EN PUNTOS DE MONITOREO	\$ 1,640,000
CIPS	\$ 54,863,813
TOTAL AÑO	\$ 60,624,273

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Tabla 38

Costos de operación y mantenimiento del equipo XARTU/1-CP para el sistema de protección catódica gasoducto Pueblo Nuevo Bosconia Cuatro Vientos

COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO XARTU/1-CP PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO PUEBLO NUEVO BOSCONIA CUATRO VIENTOS	
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	VALOR SUBTOTAL/AÑO
INSPECCIÓN PREVENTIVA EQUIPO XARTU/1-CP	\$ 1,640,000
CIPS	\$ 19,552,529
TOMA DE POTENCIAL POSTE A POSTE	\$ 13,035,019
TOTAL AÑO	\$ 34,227,549

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Tabla 39

Costos de operación y mantenimiento del equipo rectificador AC/DC para el sistema de protección catódica gasoducto Pueblo Nuevo Bosconia Cuatro Vientos

COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL RECTIFICADOR AC/DC PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA GASODUCTO PUEBLO NUEVO BOSCONIA CUATRO VIENTOS	
DESCRIPCIÓN ÍTEMS	VALOR SUBTOTAL/AÑO
PROMEDIO DE PAGO RECIBOS DE ELECTRICIDAD	\$ 2,555,100
INSPECCIÓN PREVENTIVA RECTIFICADOR AC/DC	\$ 1,640,000
INSPECCIÓN DE POTENCIAL EN PUNTOS DE MONITOREO	\$ 1,640,000
CIPS	\$ 39,105,058
TOTAL AÑO	\$ 44,940,158

Nota: (Área de Integridad de Gases del Caribe S.A. E.S.P.)

Tabla 40

Resumen comparativo costos de operación y mantenimiento de los sistemas de protección catódica

COMPARATIVO DE COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO		
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA	EQUIPO XARTU/1-CP	RECTIFICADOR AC/DC
GASODUCTO BOSCONIA VALLEDUPAR	\$ 48,332,607	\$ 61,235,688
GASODUCTO BOSCONIA TUCURINCA	\$ 47,359,844	\$ 60,624,273
GASODUCTO PUEBLO NUEVO BOSCONIA CUATRO VIENTOS	\$ 34,227,549	\$ 44,940,158
TOTAL AÑO	\$ 129,920,000	\$ 166,800,120
DIFERENCIA	\$	36,880,120
PORCENTAJE DIFERENCIA		28.39%
RELACIÓN		1 : 1,2839

Nota: (Autor,2021) Vale la pena mencionar que la vida estimada del banco de baterías es de 8 a 5 años y los paneles solares tienen vida útil de 20 años aproximadamente. El tipo de mantenimiento contemplado para esta comparación fue el preventivo no se tuvo en cuenta los mantenimientos correctivos.

9. Conclusiones

La integración de un sistema SCADA en la protección catódica en la red de gasoductos de distribución de 8 pulgadas en los departamentos Cesar y Magdalena propiedad de la empresa Gases del Caribe S.A. Empresa de Servicios Públicos, estableció un hito en la automatización y control de las variables principales de un sistema de protección catódica en un gasoducto de distribución en Colombia, ya que fue la primera implementación documentada de la integración de un sistema de protección catódica a un sistema SCADA.

El rediseño del sistema de protección catódica por corriente impresa del gasoducto de acero 8" de interconexión en los departamentos Magdalena y Cesar, que consideró el uso del mismo espacio disponible, reutilizó las camas anódicas instaladas y reemplazó los equipos de inyección de corriente, optimizó por completo el conjunto del sistema y pudo cubrir las necesidades operativas asociadas a la mitigación de la corrosión.

El uso de energía solar fotovoltaica en los 3 puntos de inyección en el sistema de protección catódica proporciona una alternativa de autonomía energética frente al suministro de energía eléctrica convencional, mejorando la operatividad del sistema en su totalidad.

Con base en los resultados obtenidos en la utilización de energía solar fotovoltaica como fuente de alimentación del sistema, se puede demostrar la contribución de las energías limpias y el concepto de eficiencia energética aplicado a la protección catódica.

De acuerdo con los estudios realizados mediante la técnica CIPS, se evidenció el buen funcionamiento del sistema de protección catódica en toda la trayectoria de la red de gasoductos de interconexión Magdalena – Cesar, ya que cumplen el criterio de por lo menos -850mv Vs un

electrodo de referencia cobre sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) establecidos en la normativa NACE SP0169-2013.

Las lecciones aprendidas del caso de éxito en la implementación de un sistema de protección catódica automatizado en la red de gasoductos de distribución de 8 pulgadas en los departamentos Cesar y Magdalena, alimentado con energía solar deben ser consideradas para su replicación en otros sistemas de protección catódica por corriente impresa en gasoductos de distribución y/o transporte que posean problemas de continuidad operativa por presentar frecuentes interrupciones del suministro eléctrico convencional, con el fin de que se apliquen como estrategia de redesarrollo de los mismos.

Los resultados obtenidos en la comparación de costos en la construcción e instalación del equipo XARTU/1-CP respecto al equipo rectificador AC/DC inicialmente instalado, corrobora que el ultimo tuvo un sobre costo de 146,29%.

Con la implementación del sistema de protección catódica automatizado en la red de gasoductos de distribución en los departamentos Cesar y Magdalena, alimentado con energía solar, la empresa Gases del Caribe redujo los costos anuales de la operación y mantenimiento del sistema un 28,39% respecto al sistema inicialmente instalado.

10. Recomendaciones

Con el objetivo de determinar el valor del potencial de sobreprotección, para prevenir el desprendimiento catódico, hay que realizar una prueba destructiva controlada en una muestra representativa de la tubería instalada en un laboratorio certificado y con ello se elimina la incertidumbre del valor de referencia de -1.2Vdc y con base a los resultados se podría evaluar nuevamente las condiciones de inyección de corriente al sistema de protección catódica.

Debido a que solo se cuenta con estudios de resistividades del terreno, se propone realizar estudios en el suelo para validar la presencia de bacterias sulfato reductoras.

Las buenas prácticas de ingeniería referenciadas en la literatura en sistemas de protección catódica por corriente impresa aconsejan instalar un rectificador cada 30Km. Pero teniendo en cuenta que la red de gasoductos es nueva y se están monitoreando las variables del sistema, se recomienda instalar 12 equipos Wilog en las válvulas seccionadoras (Fundación, Santa Rosa, Caracolicito, El Copey, Pueblo Nuevo, Cuatro Vientos, Bosconia, Caracolí Palmira, Caracolí Villa Clara, Mariangola, Aguas Blancas y Valencia de Jesús) para validar en tiempo real el comportamiento del sistema de protección catódica cada 15Km aproximadamente.

Se recomienda realizar inspecciones CIPS cada 24 meses, para verificar la efectividad del sistema de protección catódica.

Referencias Bibliográficas

- Akcayol, M., & Sagiroglu, S. (2007). Neuro-fuzzy controller implementation for an adaptive cathodic protection on Iraq-Turkey crude oil pipeline. *Applied Artificial Intelligence*, 21(3), 241-256. doi:10.1080/08839510701196345.
- CP3 (2007)– Cathodic Protection Technician Manual, NACE International.
- CP4 (2009)– Cathodic Protection Technician Manual, NACE International.
- CP2 (2010)– Cathodic Protection Technician Manual, NACE International.
- Daniel Alejandro, R., Enrique, V., & Helver Mauricio, M. (2016). Diseño e implementación de un sistema de adquisición y monitoreo de datos (shm) para un rectificador de protección catódica usado en ductos. *Respuestas*, Vol 21, Iss 1, Pp 45-55 (2016), (1), 45.
- Dávila, H. O., Bolivar Cely, S., & Aponte, L. A. (2007). Estudio de corrosión en tuberías por medio de un equipo de radiografía industrial. *Revista Colombiana De Física*, 39(2), 471-474.
- Del Torres Hernández, J.), Del Angel Meraz, E.), & Veleza, L.). (2017). Assessment corrosivity soils along a pipeline buried with a cathodic protection system. *Revista Latinoamericana De Metalurgia Y Materiales*, 37(1), 19-26.
- Groysman, A. (2017). Corrosion problems and solutions in oil, gas, refining and petrochemical industry. *Koroze A Ochrana Materialu*, Vol 61, Iss 3, Pp 100-117 (2017), (3), 100. doi:10.1515/kom-2017-0013
- Guillén Banacloche, M. B. (2015). Modelo de comportamiento de variables que afectan a la corrosión y protección catódica de

- estructuras de acero: aplicación práctica a las conducciones enterradas ya los sistemas de captación continua de agua en desaladoras (Doctoral dissertation, Minas).
- International, N. (2013, January 1). Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems. NACE International.
- Jorge Andrés, C., Juan, D., Sergio, P., & Alex, R. (2005). Análisis estadístico de los factores que intervienen en la corrosión de tuberías enterradas. Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia, Iss 34, Pp 23-34 (2005), (34), 23.
- Kessler, R. J., Powers, R. G., & Lasar, I. R. (2000, January). Battery powered impressed current cathodic protection. In CORROSION 2000. NACE International.
- Lopez-Baltazar, E., & Genesca, J. (2009, January 1). Laboratory Corrosion Investigation Of Some Cp Criteria. NACE International.
- Peratta, A., Baynham, J., Adey, R., & Pimenta, G. F. (2009, January 1). Intelligent Remote Monitoring System For Cathodic Protection Of Transmission Pipelines. NACE International.
- Petrie, C. W., & Mott, W. (2017, April 27). Automated Cathodic Protection Waveform Analysis. NACE International.
- Piedmont, E., & Tehada, T. (2010, January 1). Solar Powered Cathodic Protection System. NACE International.
- Southern, D. (2008, January 1). Pipeline Integrity Automation. NACE International.
- Sneath, O. (2000, January 1). Cathodic Protection Remote Monitoring. NACE International.
- Held, C. (2010, January 1). Implementing Remote Wireless Monitoring Of Pipeline Integrity And Cathodic Protection. NACE International.

- Velázquez, J. C., Caleyó, F., Valor, A., & Hallen, J. M. (2011). Modelado del crecimiento de picaduras en tuberías enterradas que transportan hidrocarburos utilizando técnicas estadísticas. *Revista De Metalurgia*, Vol 47, Iss 3, Pp 244-261 (2011), (3), 244.
- Zavala-Olivares, G., Esquivel, R. G., Gayosso, M. J. H., Trejo, A. G., Gurrion, C. C., & Villalobos, E. B. (2006, January 1). Influence of Sulfate Reducing Bacteria on the Cathodic Protection Potential of XL52 Steel. NACE International.

