



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**DISEÑO DEL SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA EMBARCACIÓN DE TURISMO
TIPO YATE CON CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE 75 KW CONSIDERANDO
CORRIENTES DE FRECUENCIA INDUSTRIAL Y DE TIPO RAYO.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: ERIC ALBERTO JURADO BRAVO

TUTOR: ING. ROY FREDDY SANTANA JARA.

Guayaquil – Ecuador

2026

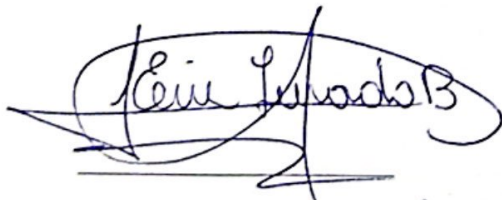
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Eric Alberto Jurado Bravo con documento de identificación N° 0930381603 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 13 de febrero del año 2026.

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Eric Jurado B', with a large, stylized flourish extending from the end of the signature.

Eric Alberto Jurado Bravo

0930381603

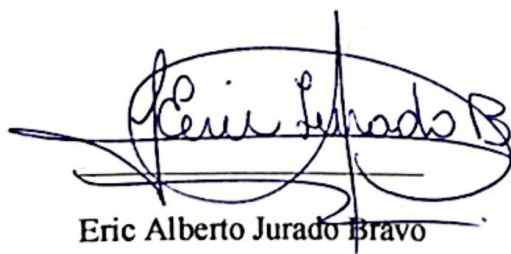
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Eric Alberto Jurado Bravo con documento de identificación No. 0930381603, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: "Diseño del Sistema Puesta a Tierra de una Embarcación de Turismo Tipo Yate con Capacidad de Generación de 75 kW Considerando Corrientes de Frecuencia Industrial y de Tipo Rayo" ,el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 13 de febrero del año 2026.

Atentamente,



Eric Alberto Jurado Bravo

0930381603

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Roy Freddy Santana Jara con documento de identificación N° 0910972637, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DEL SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA EMBARCACIÓN DE TURISMO TIPO YATE CON CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE 75 KW CONSIDERANDO CORRIENTES DE FRECUENCIA INDUSTRIAL Y DE TIPO RAYO, realizado por Eric Alberto Jurado Bravo con documento de identificación N° 0930381603, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 13 de febrero del año 2026.

Atentamente,



Ing. Roy Freddy Santana Jara, MSc.

0910972637

DEDICATORIA

Dedico el esfuerzo y el fin de mi carrera a Dios, sin el nada, a mi familia a mis hijos y a mí.

Eric Alberto Jurado Bravo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por tan importante logro para mí, a mis padres, abuela, hijos, Nathaly, gracias por el apoyo, gracias por la espera. Gracias a los docentes con verdadera vocación salesiana que aportaron de manera positiva e influyente a lo largo de mi carrera, gracias al consejo "por más difícil que se ponga o mal que vaya, no dejes la carrera, sigue y termina".

Eric Alberto Jurado Bravo

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO	VII
ÍNDICE DE ECUACIONES	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
RESUMEN	XIX
✓ PALABRAS CLAVES:	xx
ABSTRACT	XXI
✓ KEYWORDS:	xxii
GLOSARIO DE SIMBOLOGÍA	XXIII
GLOSARIO DE UNIDADES	XXIV
ACRÓNIMOS.....	XXV

PREFACIO	XXVII
1. CAPÍTULO I.....	1
1.1. TÍTULO.	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.3. JUSTIFICACIÓN.	1
1.4. IMPORTANCIA Y ALCANCE.....	2
1.4.1. SEGURIDAD DE PERSONAS Y BIENES:	3
1.4.2. PROTECCIÓN DE EQUIPOS:.....	3
1.4.3. IMPACTO ECONÓMICO PAÍS:	3
1.4.4. ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO:	3
1.5. DELIMITACIÓN.....	4
1.6. OBJETIVOS.....	4
1.6.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
2. CAPÍTULO II.	6
2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	6
2.1.1. EMBARCACIÓN.....	6
2.1.2. CONDUCTIVIDAD, RESISTIVIDAD Y SALINIDAD DEL AGUA DE MAR.....	6
2.1.3. SISTEMAS DE ATERRIZADO.....	7
2.1.4. NORMATIVA.....	7
2.1.4.1. IEC 62305-1: PROTECTION AGAINST LIGHTNING – PART1: GENERAL PRINCIPLES..	7
2.1.4.2. IEC 62305-2: PROTECTION AGAINST LIGHTNING – PART2: RISK MANAGEMENT.....	8
2.1.4.3. IEC 62305-3: PROTECTION AGAINST LIGHTNING – PART3: PHYSICAL DAMAGE TO STRUCTURES AND LIFE HAZARD.....	8

2.1.4.4.	IEC 61643-11: LOW-VOLTAGE SURGE PROTECTIVE DEVICES – PART 11: SURGE PROTECTIVE DEVICES CONNECTED TO LOW-VOLTAGE POWER SYSTEMS – REQUIREMENTS AND TEST METHODS.....	8
2.1.4.5.	IEC 60479-1: EFFECTS OF CURRENT ON HUMAN BEINGS AND LIVESTOCK – PART 1: GENERAL ASPECTS.....	9
2.1.4.6.	NTC 4552-1: PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.	9
2.1.4.7.	ASTM B843: STANDARD SPECIFICATION FOR ANODES FOR CATHODIC PROTECTION.....	9
2.1.4.8.	IEEE STD 142 (GREEN BOOK): RECOMMENDED PRACTICE FOR GROUNDING INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS.....	10
2.1.4.9.	IEEE STD 45: RECOMMENDED PRACTICE FOR ELECTRICAL INSTALLATIONS ON SHIPBOARD.....	10
2.1.4.10.	ABYC E-11: AC AND DC ELECTRICAL SYSTEMS ON BOATS.....	10
2.1.4.11.	ABYC E-28: GALVANIC ISOLATORS.	10
2.1.4.12.	ABYC E-2: CATHODIC PROTECTION.....	10
2.1.5.	CORROSIÓN.....	11
2.1.6.	CORROSIÓN MARINA.	11
2.1.6.1.	FACTORES AFECTANTES.....	11
2.1.6.2.	FACTORES QUE AFECTAN A LA CORROSIÓN.....	12
2.1.6.3.	CORRIENTE PARÁSITA.....	12
2.1.6.4.	CORROSIÓN GALVÁNICA.....	13
2.1.6.5.	CORROSIÓN ELECTROLÍTICA.....	13
2.1.6.6.	PROTECCIÓN CATÓDICA.....	14
2.1.7.	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	15
2.1.7.1.	NATURALEZA DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	15
2.1.7.2.	PROTECCIÓN CONTRA RAYOS PARA EMBARCACIONES A MOTOR.	16
2.1.8.	DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA.....	16
2.1.8.1.	DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES (DPS).	16
2.1.8.2.	AISLADOR GALVÁNICO.....	17
2.1.8.3.	IMPORTANCIA DEL AISLADOR GALVÁNICO.....	18

2.1.8.4.	TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO.	18
2.1.8.5.	MONITORES DE AISLAMIENTO (IMD).	19
2.1.8.6.	ANILLOS COLECTORES (SLIP RINGS).	20
2.1.8.7.	ÁNODOS DE SACRIFICIO Y ELECTRODOS DE DISIPACIÓN EN SISTEMAS MARINOS. 21	
2.1.9.	FALLA A TIERRA.	21
2.1.9.1.	TOPOLOGÍA DE FALLAS.	22
2.1.10.	LIGHTNING PROTECTION SYSTEM (LPS).	22
2.1.10.1.	COMPONENTES.	22
2.1.10.2.	IMPORTANCIA EN AMBIENTE MARINO.	22
2.1.11.	SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT).	23
2.1.11.1.	ENLACE DE UNIÓN (BONDING).	24
2.1.11.2.	PUESTA A TIERRA (GROUNDING).	25
2.1.11.3.	ENLACE DE UNIÓN Y PROTECCIÓN CATÓDICA.	25
2.1.11.4.	PUNTOS DE REFERENCIA CONECTADOS AL ENLACE DE UNIÓN.	26
2.1.11.5.	TENSIONES DE SEGURIDAD.	26
3.	CAPÍTULO III.	27
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO.	27
3.1.1.	GENERALIDADES.	27
3.1.2.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.	27
3.1.3.	ESTADO DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA ACTUAL:	30
3.1.4.	JUSTIFICACIÓN DE ESTUDIO.	31
3.1.5.	DISEÑOS UNIFILARES DE LA EMBARCACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.	32
4.	CAPÍTULO IV.	34
4.1.	ANÁLISIS DEL TRABAJO.	34
4.1.1.	CÓDIGO EN MATLAB.	34
4.1.2.	RESULTADOS DE LA EJECUCIÓN DEL CÓDIGO EN MATLAB.	39

5. CAPÍTULO V.....	41
5.1. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.	41
5.1.1. RECOPIACIÓN DE DATOS TÉCNICOS DE LA EMBARCACIÓN.....	41
5.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO CLIMATOLÓGICO Y MARINO.....	44
5.1.3. ANÁLISIS NORMATIVO Y CONCEPTUAL.....	45
5.1.4. MODELOS DE CÁLCULOS APLICADOS.....	47
5.1.4.1. APANTALLAMIENTO LPS.	47
5.1.4.1.1. ÁREA DE CAPTURA EQUIVALENTE Y NÚMERO ANUAL DE DESCARGAS (IEC62305-2).....	47
5.1.4.1.2. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (IEC62305-2).....	48
5.1.4.1.3. SELECCIÓN DEL NIVEL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS (LPL) Y DISEÑO PRELIMINAR DEL LPS.	52
5.1.4.2. SISTEMA PUESTA A TIERRA SPT.....	55
5.1.4.2.1. DIMENSIONAMIENTO DE ÁNODO DE SACRIFICIO.	55
5.1.4.2.2. BARRA EQUIPOTENCIAL Y BONDING CONDUCTOR.....	61
5.1.4.2.3. TENSIONES DE TOQUE, PASO Y GRADIENTE DE POTENCIAL.....	64
5.1.4.2.4. AISLADOR GALVÁNICO.....	66
5.1.4.2.5. MONITOR DE AISLAMIENTO (IMD).....	66
5.2. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN EN EL PROGRAMA DE ANALIZADOR DE TRANSITORIOS ELÉCTRICOS – ELECTRICAL TRANSIENT ANALYZER PROGRAM (ETAP).	67
5.2.1. MODELADO DEL GENERADOR.....	67
5.2.2. MODELADO DEL DISYUNTOR DEL GENERADOR.....	68
5.2.3. MODELADO DEL BARRAJE DEL GENERADOR.....	69
5.2.4. MODELADO DE LAS ACOMETIDAS DE BAJA TENSIÓN (BT).....	70
5.2.5. MODELADO DEL BARRAJE DE LA CARGA.....	72
5.2.6. MODELADO DEL DISYUNTOR DE LA CARGA.....	72
5.2.7. MODELADO DE LA CARGA TOTAL DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL YATE.....	73
5.2.8. ANÁLISIS DEL FLUJO DE CARGA.....	74

5.2.9.	ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO.....	76
6.	CAPÍTULO VI.....	77
6.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.	77
6.1.1.	ESTADO ACTUAL DE LA EMBARCACIÓN.....	77
6.1.2.	ESTADO PROYECTADO CON IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS.	78
6.1.3.	VALIDACIÓN TÉCNICA.	79
6.1.3.1.	VALIDACIÓN DE NIVEL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS LPL.	79
6.1.3.2.	VALIDACIÓN DE TENSIONES DE SEGURIDAD.....	81
6.1.3.3.	VALIDACIÓN DE IMPEDANCIA Y DIMENSIONAMIENTO DE ÁNODOS.....	82
6.1.4.	PRUEBA DE ELECTRODO DE CLORURO DE PLATA.	83
6.1.5.	ESQUEMA GRÁFICO SPT Y LPS.....	84
	CONCLUSIONES.....	87
	RECOMENDACIONES.....	89
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	91
	ANEXOS.	95
	ANEXO 1: FICHA TÉCNICA AISLADORA GALVÁNICO.	95
	ANEXO 2: FICHA TÉCNICA IMD.....	96
	ANEXO 3: FICHA TÉCNICA DPS PRINCIPAL.	99
	ANEXO 4: FICHA TÉCNICA DPS CASCADAS.	100
	ANEXO 5: FICHA ÁNODOS DE SACRIFICIO.....	101
	ANEXO 6: FICHA TÉCNICA ANILLOS COLECTORES.	104
	ANEXO 7: RUTA DE TIERRA CUBIERTA INFERIOR.....	111

ANEXO 8: RUTA DE TIERRA SALA DE MÁQUINAS.	112
ANEXO 9: RUTA DE TIERRA CUBIERTA PRINCIPAL.	113
ANEXO 10: RUTA DE TIERRA CUBIERTA SUPERIOR.	114
ANEXO 11: RUTA DE TIERRA Y LPS EMBARCACIÓN COMPLETA.	115
ANEXO 12: FICHA TÉCNICA DEL GENERADOR MAGNAPLUS® MODELO 363PSL1607T60.....	116
ANEXO 13: ANÁLISIS DEL FLUJO DE CARGA EN ETAP.....	119
ANEXO 14: ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO EN ETAP.	129

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de la resistividad.....	7
Ecuación 2. Cálculo del área de captura equivalente.	47
Ecuación 3. Cálculo del número anual de descargas directas.	48
Ecuación 4. Tiempo promedio entre descargas.	48
Ecuación 5. Evaluación del riesgo de descargas atmosféricas.	48
Ecuación 6. Escenario A con R_1 (vidas).....	49
Ecuación 7. Escenario A con R_4 (vidas).....	49
Ecuación 8. Escenario A con Base total.....	49
Ecuación 9. Escenario B con R_1 (vidas).....	50
Ecuación 10. Escenario B con R_1 Mejorado.	50
Ecuación 11. Escenario B con R_1 Definitivo.	50
Ecuación 12. Escenario B con R_4 Definitivo.	50
Ecuación 13. Cobertura por método de la esfera rodante.....	52
Ecuación 14. Resistencia a 60 Hz.	53
Ecuación 15. Inductancia aproximada de una cinta recta.....	54
Ecuación 16. Reactancia inductiva.....	54
Ecuación 17. Superficie mojada WSA.	55
Ecuación 18. Condición inicial del factor de pintura.	55
Ecuación 19. Fin de ciclo del factor de pintura.	56
Ecuación 20. Corriente inicial del escenario propuesto.	57
Ecuación 21. Corriente de mantenimiento del escenario propuesto.....	57
Ecuación 22. Ponderación para un tiempo de 3 años.	57
Ecuación 23. Masa de ánodo necesaria.	58
Ecuación 24. Resistencia de dispersión.....	58

Ecuación 25. Caída de tensión típica para Fase inicial.	59
Ecuación 26. Caída de tensión típica para Fase de mantenimiento.....	59
Ecuación 27. La profundidad de penetración (skin Depth) para frecuencia de 25 kHz.	60
Ecuación 28. La profundidad de penetración (skin Depth) para frecuencia de 50 kHz.	60
Ecuación 29. La profundidad de penetración (skin Depth) para frecuencia de 100 kHz.	60
Ecuación 30. Caída de tensión para R_{eq}	61
Ecuación 31. Cálculo de la sección del conductor.	63
Ecuación 32. Cálculo de la corriente nominal.....	63
Ecuación 33. Cálculo de la corriente de falla.....	63
Ecuación 34. Cálculo de la sección posterior a una corriente de falla.	63
Ecuación 35. Cálculo de la tensión de toque.....	65
Ecuación 36. Cálculo de la tensión de toque con casco-agua a 1 metro.	65
Ecuación 37. Cálculo de la tensión de toque a 1 metro del caso y paso de 1 metro.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. TACC del archipiélago entre 2013-2022.....	xxvii
Figura 2. Promedio de densidad de descargas atmosféricas (Descargas/km ² -año).....	xxviii
Figura 3. Esquema protección catódica.....	14
Figura 4. DPS Acti 9 iPRD 12.5r.	17
Figura 5. AG ProSafe FS30.	18
Figura 6. Transformador de asilamiento.	19
Figura 7. IM Vigilohm IM400.	20
Figura 8. Funcionamiento anillos colectores.....	20
Figura 9. <i>Bonding bus bar</i>	24
Figura 10. Grounding, protección catódica.	25
Figura 11. Embarcación para el estudio.	27
Figura 12. Características generales de la embarcación.....	28
Figura 13. Motor de propulsión Scania.....	28
Figura 14. Grupo electrógeno Caterpillar.	29
Figura 15. Conexión estrella en generador.....	30
Figura 16. Diagrama Unifilar General Plano 01DUG.....	32
Figura 17. Panel 12 V. DC “Sala de Máquinas” Plano 01PM.	33
Figura 18. Diagrama Unifilar General Plano 01PP.....	33
Figura 19. Conexión entre <i>bonding bus bar</i> y ánodo de sacrificio.	61
Figura 20. Datos de placa del Generador del yate.....	67
Figura 21. Datos del Generador ingresados en ETAP.	68
Figura 22. Datos del disyuntor del Generador.	69
Figura 23. Datos del disyuntor del Generador ingresados en ETAP.	69
Figura 24. Barraje del Generador.....	70

Figura 25. Datos del Barraje del Generador ingresados en ETAP.....	70
Figura 26. Conductor 300 KCMIL 3/C DPNP MARINE SHIPBOARD CABLE 90°C – 600 V E86047 (UL) 1988.	71
Figura 27. Conductor de neutro 1/0 AWG 600 V (INCABLE INCAPLAST TW).....	71
Figura 28. Datos Principales de los Conductores ingresados en ETAP.....	71
Figura 29. Definición de los tipos de conductores ingresados en ETAP.	71
Figura 30. Barraje de la Carga.	72
Figura 31. Datos del Barraje de la Carga ingresados en ETAP.	72
Figura 32. Datos del disyuntor de la Carga.....	73
Figura 33. Datos del disyuntor de la Carga ingresados en ETAP.....	73
Figura 34. Fotografía de la embarcación y sus diversas cargas luces de navegación, reflectores, radares y entre otros.	74
Figura 35. Medición en tiempo real de la Línea L2 de la Carga Total de la embarcación.	74
Figura 36. Datos del disyuntor de la Carga ingresados en ETAP.....	74
Figura 37. Diseño del diagrama unifilar del sistema eléctrico de la embarcación en ETAP..	75
Figura 38. Flujo de Carga del sistema eléctrico de la embarcación en ETAP.	76
Figura 39. Análisis de cortocircuito del sistema eléctrico de la embarcación en ETAP.....	76
Figura 40. Estados de protección catódica con respecto a la lectura del medidor.	84
Figura 41. Perfil embarcación.....	84
Figura 42. Lazo de tierra en sala de máquinas.	85
Figura 43. Ruta de tierra cubierta inferior.....	85
Figura 44. Ruta de tierra cubierta principal.....	86
Figura 45. Ruta de tierra cubierta superior.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros eléctricos de sustancias comunes.	6
Tabla 2. Diferentes tipos de resistividad.	7
Tabla 3. Parámetros climatológicos y oceanográficos de referencia en las Galápagos.	45
Tabla 4. Normas y estándares aplicados en el desarrollo metodológico.	47
Tabla 5. Resumen comparativo de escenarios de riesgo.	52
Tabla 6. Niveles de protección según IEC.	52
Tabla 7. Cantidad y nombres de barras en general.	62
Tabla 8. Riesgo asociado y el estado actual de la embarcación.	78
Tabla 9. Estado proyectado con implementación de medidas.	79

RESUMEN

Las Islas Galápagos, declaradas Patrimonio Natural de la Humanidad por la UNESCO, representan un entorno marino único y altamente sensible, donde la actividad turística constituye una de las principales fuentes de desarrollo económico para el Ecuador. Sin embargo, muchas embarcaciones de transporte turístico que operan en este archipiélago funcionan con sistemas eléctricos improvisados, carentes de medidas de seguridad fundamentales frente a fenómenos eléctricos, descargas atmosféricas y corrosión. A esta problemática se suma el impacto del cambio climático, que ha incrementado la actividad eléctrica atmosférica en la región, aumentando la exposición de las embarcaciones a rayos y transitorios eléctricos.

El presente trabajo se centra en el diseño integral de un sistema de protección eléctrica y contra rayos para una embarcación de casco metálico dedicada al turismo en las Galápagos. El diagnóstico inicial evidenció la ausencia de un sistema de puesta a tierra (SPT), de un sistema de protección contra rayos (LPS), de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) y de estrategias de control de corrosión, lo que representaba un alto nivel de riesgo para la seguridad de pasajeros, tripulación y equipos eléctricos y electrónicos, cuyo valor total se estima en 2,5 millones de dólares.

La metodología aplicada se estructuró de forma cronológica y sustentada en normas internacionales (IEC 62305, IEC 60479-1, IEEE Std 45, ASTM B843, NACE y ABYC). Inició con la recopilación de datos técnicos de la embarcación, seguida de la caracterización del entorno marino y climatológico, para luego avanzar hacia el análisis normativo, la selección de modelos de cálculo y el dimensionamiento de los sistemas de protección. Los cálculos fueron desarrollados tanto en Word como en MATLAB, lo que permitió corroborar los resultados mediante herramientas computacionales. Entre los parámetros evaluados se encuentran el área de captura equivalente, el índice de riesgo (N_r), las tensiones de toque y gradiente de potencial, así como el dimensionamiento e impedancia de ánodos de sacrificio bajo las fases inicial y de mantenimiento.

El modelado y análisis del sistema eléctrico de la embarcación con el programa ETAP permitió confirmar la correcta operación del generador, sus dispositivos de protección y la distribución de cargas a través del diagrama unifilar, mediante los estudios de flujo de carga y cortocircuito se validaron los niveles de tensión, corrientes y capacidades de los componentes, aseverando

un funcionamiento estable, selectivo y confiable del sistema, lo que ampara la idoneidad del diseño propuesto para la operación positiva de la embarcación.

El diseño final propone un sistema LPS de nivel de protección II, compuesto por un captador aéreo de 12 m, doble bajante y placa sumergida dedicada, junto con un SPT conformado por ánodos de sacrificio distribuidos estratégicamente, un *bonding bus bar* central y barras colectoras secundarias. Adicionalmente, se plantea la validación práctica mediante la prueba con electrodo de cloruro de plata, que permitirá verificar en campo el nivel de protección catódica alcanzado.

Finalmente, los resultados fueron complementados con esquemas gráficos elaborados sobre los planos existentes de la embarcación, en los que se representan las rutas de bajantes, la interconexión de barras colectoras y la disposición de los elementos del sistema. Estos esquemas, junto con los cálculos y la validación normativa, confirman la viabilidad técnica del proyecto y evidencian una reducción significativa de los riesgos eléctricos y de corrosión, garantizando mayor seguridad operativa y preservación de la inversión económica en el contexto marino de las Islas Galápagos.

✓ **PALABRAS CLAVES:**

Galápagos, sistema de puesta a tierra, protección contra rayos, corrosión marina, seguridad eléctrica, MATLAB, ETAP y turismo sostenible.

ABSTRACT

The Galápagos Islands, declared a UNESCO World Heritage Site, represent a unique and highly sensitive marine environment, where tourism is one of Ecuador's main sources of economic development. However, many tourist vessels operating in this archipelago rely on improvised electrical systems, lacking fundamental safety measures against electrical phenomena, lightning strikes, and corrosion. This problem is compounded by the impact of climate change, which has increased atmospheric electrical activity in the region, thus increasing the vessels' exposure to lightning and electrical transients.

This work focuses on the comprehensive design of an electrical and lightning protection system for a metal-hulled vessel used for tourism in the Galápagos. The initial assessment revealed the absence of a grounding system, a lightning protection system, surge protection devices, and corrosion control strategies, representing a high level of risk to the safety of passengers, crew, and electrical and electronic equipment, whose total value is estimated at \$2.5 million.

The methodology applied was structured chronologically and based on international standards (IEC 62305, IEC 60479-1, IEEE Std 45, ASTM B843, NACE, and ABYC). It began with the collection of technical data for the vessel, followed by the characterization of the marine and climatological environment, and then proceeded to the regulatory analysis, the selection of calculation models, and the sizing of the protection systems. The calculations were performed in both Word and MATLAB, allowing for the verification of the results using computational tools. Among the parameters evaluated were the equivalent capture area, the risk index (N_r), touch voltages and potential gradient, as well as the sizing and impedance of sacrificial anodes during the initial and maintenance phases.

Modeling and analyzing the vessel's electrical system with the ETAP software confirmed the correct operation of the generator, its protection devices, and the load distribution through the single-line diagram. Load flow and short-circuit studies validated the voltage levels, currents, and capacities of the components, ensuring stable, selective, and reliable system operation. This supports the suitability of the proposed design for the vessel's successful operation.

The final design proposes a Level II protection LPS system, consisting of a 12-meter overhead collector, a double downpipe, and a dedicated submerged plate, along with an SPT comprised of strategically distributed sacrificial anodes, a central bonding bus bar, and secondary bus bars.

Additionally, practical validation is proposed through testing with a silver chloride electrode, which will allow for field verification of the level of cathodic protection achieved.

Finally, the results were complemented with graphical diagrams based on the vessel's existing plans, depicting the downpipe routes, the interconnection of busbars, and the arrangement of system components. These diagrams, along with the calculations and regulatory validation, confirm the project's technical feasibility and demonstrate a significant reduction in electrical and corrosion risks, ensuring greater operational safety and preserving the economic investment in the marine environment of the Galapagos Islands.

✓ **KEYWORDS:**

Galápagos, grounding system, lightning protection, marine corrosion, electrical safety, MATLAB, ETAP and sustainable tourism.

GLOSARIO DE SIMBOLOGÍA

%:	Porcentaje o Porcentual.
©:	Marca de Derechos de Autor.
®:	Marca Registrada.
™:	Marca Comercial.
°:	Grado(s).
“:	Pulgada(s).
μ:	Permeabilidad relativa.
ε:	Permitividad relativa.
S/m:	Conductividad.
Ω:	Ohm(s).
Ωm:	Resistividad

.

GLOSARIO DE UNIDADES

Descargas/km²-año: Descargas atmosféricas con respecto al kilómetro cuadrado en un año.

k: Mil(es).

kW: Kilo vatio(s).

mm: Milímetro(s).

mm²: Milímetro(s) al cuadrado.

ACRÓNIMOS

ABYC:	Consejo Americano de Barcos y Yates.
AC:	Corriente Alterna.
ACS:	Conductor de Aluminio Reforzado con Acero.
ANSI:	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.
APY:	Asociación de Patrones de Yate.
ASTM:	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales – <i>American Society for Testing and Materials</i>
AWG:	Calibre Americano de Conductores.
BT:	Baja Tensión.
CAL:	Calibre
CC / DC:	Corriente Continua / Corriente Directa.
CCF:	Corriente de Corto Circuito a Tierra.
CIOH :	Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe.
Cu:	Cobre.
DIMAR:	Dirección General Marítima.
EEQ:	Empresa Eléctrica de Quito
ETAP:	Programa Analizador de Transitorios Eléctricos – <i>Electrical Transient Analyzer Program</i> .
FP:	Factor de Potencia.
FV:	Fotovoltaico.
GYE:	Guayaquil.
HR:	Humedad Relativa.
HRG:	Conexión a Tierra de Alta Resistencia.
IEC:	Comisión Electrotécnica Internacional
IEEE:	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IG:	Islas Galápagos.
Ing.:	Ingeniero(a).
ISM:	Código Internacional de Gestión de la Seguridad.

ISO:	Organización Internacional de Normalización.
KCMIL:	Kilo milésimas de pulgada circular.
LPL:	Nivel de protección contra Rayos - <i>Level protection lightning</i> .
LPS:	Sistema de Protección contra Rayos – <i>Lightning Protection System</i> ,
MATLAB:	Laboratorio de Matrices – <i>MATrix LABoratory</i> .
MSc.:	Master en Ciencia de la Ingeniería.
MT:	Media Tensión.
Nº:	Numeración.
NACE:	Norma Internacional Practica Recomendada Alto Voltaje.
PNG:	Parque Nacional Galápagos.
PSCAD:	Diseño Asistido por Computadora de Sistemas de Energía.
PSE:	Anillos colectores – <i>Propeller Shaft Earthing System</i> .
RETIE:	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.
RIEN:	Reglamento Instalaciones Eléctrica para Navíos.
RMG:	Reserva Marina de las Galápagos.
SAFER:	Financiamiento Seguro y Asequible para la Equidad y la Resiliencia.
SeFeT:	Energía Sostenible y Transporte Eléctrico del Futuro.
SPIES:	Sistemas Inteligentes de Energía e Internet.
SPT:	Sistema de Puesta a Tierra.
TACC:	Tasa Anual de Crecimiento Compuesto.
TEPES:	Revista turca de energía eléctrica y sistemas energéticos
TPD:	Tableros Principales de Distribución.
UCSG:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

PREFACIO

El turismo náutico, especialmente en la industria de cruceros hacia destinos exclusivos como las Islas Galápagos (IG), ha experimentado un notable crecimiento en la última década. Según Casaiguano et al. [1], la Tasa Anual de Crecimiento Compuesto (TACC) de llegadas al archipiélago fue del 4.82% entre los años 2014 y 2023, como se muestra en la figura 1. Este aumento en la afluencia de turistas ha impulsado tanto la construcción de nuevas embarcaciones como la renovación de las existentes, reflejando una tendencia ascendente en la demanda de servicios turísticos en la región.

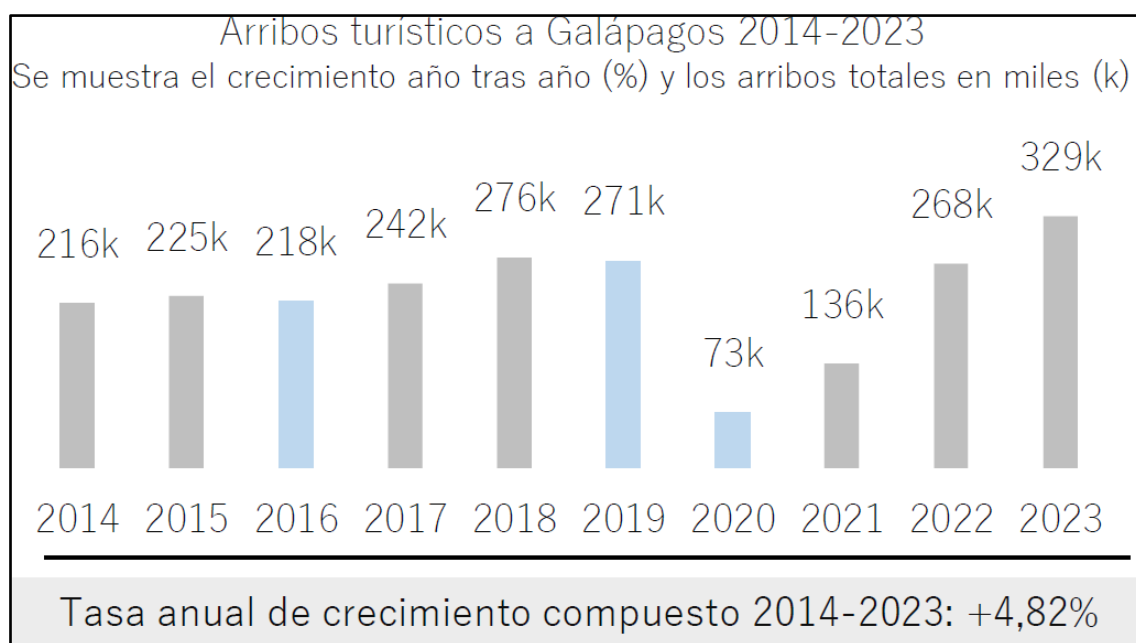


Figura 1. TACC del archipiélago entre 2013-2022.

Fuente: [1].

La importancia económica de esta industria es significativa tanto para las Galápagos como para Ecuador. A pesar de recibir solo al 28% de los turistas totales, genera el 75% de los ingresos por turismo en las IG, aportando aproximadamente 399 millones de dólares en divisas al país y empleando a más de dos mil personas locales [2].

Las nuevas embarcaciones deben no solo ofrecer comodidad, sino también cumplir con estrictas normativas técnicas y de seguridad. Un aspecto crucial en el diseño de estas embarcaciones es el SPT, que protege contra fallos y descargas eléctricas directas o indirectas, asegurando la integridad de personas y equipos a bordo.

El cambio climático ha obligado a las industrias a considerar nuevos factores en la construcción. El aumento del nivel isoceraúnico, evidenciado por una mayor frecuencia de tormentas eléctricas en la región insular, ha elevado el riesgo de impactos directos, lo que ha llevado a las empresas a tomar medidas. Es esencial tener en cuenta el nivel isoceraúnico al diseñar el SPT, para lograr un apantallamiento seguro y técnicamente adecuado complementando las protecciones físicas existentes, tal como lo afirma Zurita [3], y muestra un estudio realizado en el área de concesión de la Empresa Eléctrica de Quito (EEQ) como se detalla en la figura 2, hay un mayor número de descargas atmosféricas acompañadas de tormentas eléctricas entre los meses de septiembre y noviembre, seguido por el período de marzo a mayo, luego de diciembre a febrero, y finalmente de junio a agosto.

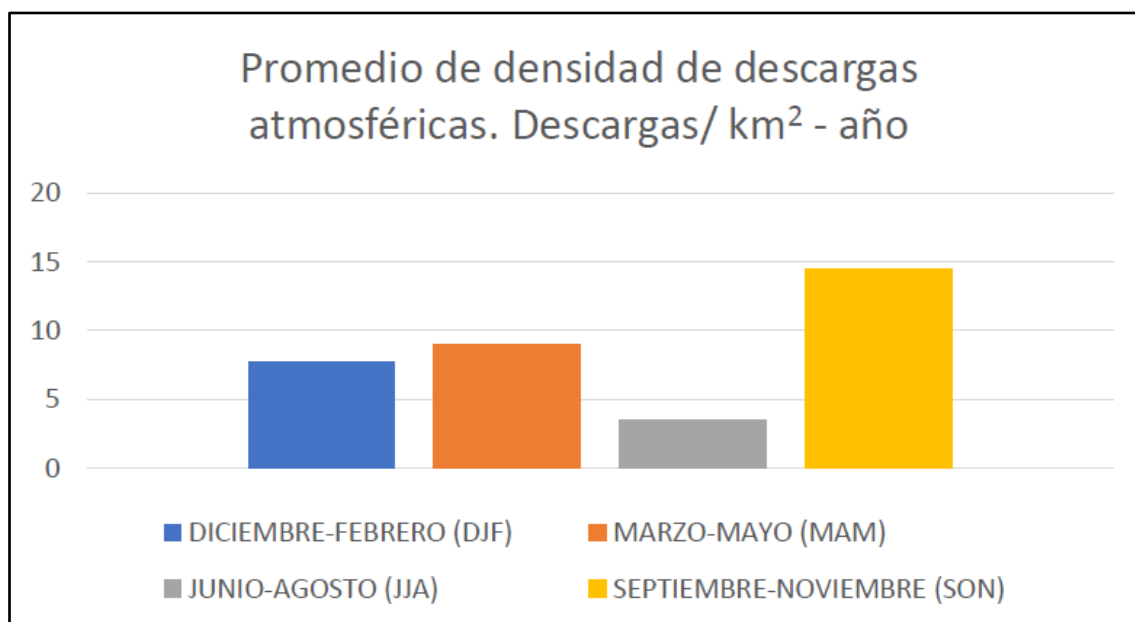


Figura 2. Promedio de densidad de descargas atmosféricas (Descargas/km²-año).

Fuente: [3].

1. CAPÍTULO I.

1.1. TÍTULO.

“DISEÑO DEL SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA EMBARCACIÓN DE TURISMO TIPO YATE CON CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE 75 KW CONSIDERANDO FRECUENCIAS DE TIPO INDUSTRIAL Y RAYO”

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Gracias al avance continuo de la tecnología, cada vez podemos integrar más aplicaciones tecnológicas en diversos procesos para asegurar el funcionamiento eficiente y controlado de las embarcaciones. En particular, el crecimiento en el uso de equipos electrónicos para el control eléctrico, climatización, navegación, comunicación, localización y monitoreo en yates de turismo subraya la necesidad de un sistema seguro que permita la disipación de corrientes de fallas o aquellas inducidas por descargas eléctricas, ya sean directas o indirectas, y esto se logra con un correcto sistema de puesta a tierra como lo detalla Camacho y Moreira. Es crucial que el diseño del SPT tenga en cuenta no solo las frecuencias de tipo industrial, sino también las altas frecuencias que pueden ser inducidas por descargas atmosféricas. La ausencia de un sistema adecuado puede resultar en fallos catastróficos bajo estas condiciones, poniendo en riesgo la seguridad de los pasajeros, la tripulación y los activos de la embarcación. A pesar de esto, muchas embarcaciones operativas carecen de un sistema de puesta a tierra robusto o recurren a soluciones improvisadas, lo cual representa un peligro considerable.

El diseño del SPT para una embarcación de turismo tipo yate con una capacidad de generación de 75 kW debe ser planificado para abordar estas necesidades. Un sistema de puesta a tierra bien diseñado no solo protegerá los equipos electrónicos y sistemas de la embarcación, sino que también garantizará la seguridad de todos a bordo al minimizar los riesgos asociados con las corrientes de falla y las descargas atmosféricas.

Implementar soluciones adecuadas y seguras es fundamental para prevenir daños significativos y garantizar el funcionamiento óptimo de la embarcación en todo momento.

1.3. JUSTIFICACIÓN.

Los SPT son esenciales en cualquier instalación eléctrica, pero su relevancia se incrementa en entornos marinos debido a las condiciones que pueden comprometer tanto

la seguridad de las personas como la integridad de los equipos. A lo largo de los años, los SPT en embarcaciones han evolucionado significativamente, pasando de soluciones improvisadas a diseños más sofisticados y conformes a las normas nacionales e internacionales.

Las embarcaciones destinadas al turismo, especialmente en destinos exclusivos como las IG, requieren altos niveles de confort y seguridad para sus pasajeros. Esto implica la necesidad de sistemas eléctricos robustos y confiables, los cuales son cruciales para asegurar una experiencia segura y placentera. El aumento en el número de turistas que eligen explorar las IG en yates y cruceros subraya la importancia de adherirse a normativas de seguridad estrictas y de garantizar que las embarcaciones cumplan con los más altos estándares técnicos.

La región de las IG experimenta un aumento en frecuencia de tormentas eléctricas, lo que incrementa los riesgos asociados con impactos directos o indirectos de rayos. Esta realidad destaca aún más la necesidad de contar con un SPT sólido y eficaz, capaz de manejar no solo las corrientes de frecuencia industrial generadas por los sistemas a bordo, sino también de disipar eficientemente las altas frecuencias inducidas por descargas atmosféricas. Un sistema de puesta a tierra bien diseñado no solo protege los equipos electrónicos y sistemas de la embarcación, sino que también salvaguarda la vida de los pasajeros y la tripulación, asegurando así una operación segura en todo momento.

1.4. IMPORTANCIA Y ALCANCE.

El turismo en Ecuador es un importante generador de divisas para el país, ocupando la tercera posición después del camarón y el banano. Dentro de esta actividad económica, el sector de turismo de crucero navegable juega un papel crucial. No solo contribuye significativamente a la generación de divisas, sino también al gasto local, la generación de empleo y la contribución tributaria, dicho sector es especialmente vital para la economía de las IG, donde representa un pilar fundamental, tal como se afirma en [2].

Romps y sus colaboradores [4], destacaron que el aumento futuro de la frecuencia de relámpagos debido al calentamiento global sigue siendo poco controlado. Se pronostica que el número de impactos de rayos aumentará un 12% por cada grado de incremento en la temperatura media mundial del aire, lo que equivale a un aumento del 50% en la frecuencia de relámpagos para el año 2024 debido al cambio climático. El artículo señala

que una atmósfera más caliente puede retener más humedad, un factor clave en la generación de descargas atmosféricas.

La falta de sistemas de puesta a tierra adecuados en embarcaciones provoca constantes deterioros en equipamientos y maquinaria, además de fallos en equipos electrónicos referidos a tierra. Por lo tanto, el diseño e implementación de un SPT robusto y eficiente en los navíos es de gran importancia debido a varias razones:

1.4.1. SEGURIDAD DE PERSONAS Y BIENES:

Un SPT adecuado es vital para garantizar la seguridad de las personas a bordo. Las fallas eléctricas o inducciones de corrientes podrían causar lesiones graves o, en el peor de los casos, la muerte. Un sistema bien diseñado puede mitigar estos riesgos, proporcionando un entorno seguro para pasajeros y tripulación.

1.4.2. PROTECCIÓN DE EQUIPOS:

El equipamiento eléctrico y electrónico a bordo representa una alta inversión y es esencial para la operación diaria de la embarcación. Un SPT eficiente protege estos equipos de fallos y daños, asegurando una operación continua sin interrupciones, lo cual es crucial para la fiabilidad y eficiencia del servicio turístico.

1.4.3. IMPACTO ECONÓMICO PAÍS:

La industria del turismo náutico genera ingresos significativos tanto para la región de las Islas Galápagos como para el país en su conjunto. La seguridad y fiabilidad de las embarcaciones son fundamentales para mantener y mejorar la reputación del destino, atrayendo así a más turistas y contribuyendo al crecimiento económico.

1.4.4. ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO:

El aumento del nivel isoceraúnico debido al calentamiento global incrementa el riesgo de descargas eléctricas directas o indirectas. Implementar un SPT robusto protegería las embarcaciones de estos eventos, asegurando su operatividad y la seguridad de todos a bordo. Adaptarse a estas condiciones cambiantes es esencial para la sostenibilidad y resiliencia del sector turístico.

1.5. DELIMITACIÓN.

Este proyecto se centrará en el diseño de un SPT específicamente para embarcaciones dedicadas al turismo náutico, con un énfasis particular en yates que operan en las Islas Galápagos. El desarrollo de este diseño se llevará a cabo en la ciudad de Guayaquil (GYE), Ecuador, donde se llevará a cabo una investigación exhaustiva, el desarrollo técnico y la validación del sistema. Este enfoque geográfico permitirá adaptar el SPT a las condiciones específicas del entorno marino de las IG, asegurando que cumpla con los estándares de seguridad y eficiencia requeridos para proteger tanto a los pasajeros como a los equipos a bordo.

1.6. OBJETIVOS.

1.6.1. OBJETIVO GENERAL.

Diseñar un sistema de puesta a tierra para una embarcación de recreo tipo yate, construida en acero naval con 39 metros de eslora y una capacidad de generación eléctrica de 75 kW, considerando tanto las condiciones de operación en frecuencias industriales como la respuesta frente a descargas atmosféricas, con el fin de garantizar la seguridad eléctrica, la protección de equipos y la integridad estructural del buque.

1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Reconocer las características técnicas de la embarcación (dimensiones principales, configuración eléctrica, tableros, generadores y sistemas auxiliares) a fin de establecer la base para el diseño de los sistemas de protección.
2. Caracterizar el entorno climatológico y marino de las Islas Galápagos, incluyendo densidad de descargas atmosféricas, parámetros eléctricos del agua de mar y condiciones ambientales, para ajustar los modelos de cálculo y el diseño de protección.
3. Analizar la normativa internacional aplicable (IEC, IEEE, ASTM, NACE, ABYC) y establecer los criterios de seguridad que deben cumplirse en el diseño del sistema de puesta a tierra (SPT) y el sistema de protección contra rayos (LPS).
4. Desarrollar los cálculos técnicos necesarios —incluyendo área de captura, índice de riesgo, tensiones de toque, gradientes de potencial,

dimensionamiento de ánodos e impedancias— utilizando Word y MATLAB como herramientas de modelado y verificación.

5. Elaborar esquemas gráficos sobre los planos de la embarcación para representar las rutas de tierra, bajantes, barras colectoras y disposición de los sistemas de protección, como resultado visual del diseño propuesto.

2. CAPÍTULO II.

2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Este trabajo de titulación está centrado en el cálculo y diseño del SPT de una embarcación de recreo con capacidad de generación de 75 kW para 32 personas rigiéndose a normativas navales existentes y a información geográfica local obtenido buscando beneficiar a turistas, tripulación, empresas operadoras de turismo náutico, economía local, gobierno, comunidad científica, medio ambiente y entre otros.

2.1.1. EMBARCACIÓN.

Llamamos embarcación a una construcción flotante con capacidad de navegar, lo cual quiere decir que se propulsa y gobierna de alguna manera bajo un fin determinado, partiendo de esta definición, es posible aclarar el resto de los conceptos apremiados [5].

2.1.2. CONDUCTIVIDAD, RESISTIVIDAD Y SALINIDAD DEL AGUA DE MAR.

En el evento de Conferencia Internacional Sobre Tecnologías de Sistemas Eléctricos realizado por la POWERCOM 2021 en la ciudad de Haikou-China [8] se destacan parámetros del agua de mar importantes para el desarrollo de este trabajo de titulación como permeabilidad relativa, permitividad relativa y conductividad del agua de mar.

	Aire	Agua Dulce	Agua de mar
Permeabilidad relativa (μ)	1	0.999	0.999
Permitividad relativa (ϵ)	1.0006	80.1	81.5
Conductividad (S/m)	0	0.01	4

Tabla 1. Parámetros eléctricos de sustancias comunes.

Fuente: [8].

En el folleto informativo de la entidad WATERBOARDS [9] la salinidad del agua de mar está entre 33 y 37 g/l. La salinidad en los océanos oscila entre aproximadamente 32 ppt (3,2%) y 40 ppt (4,0%).

La tesis de García [11] nos habla de que el valor de la resistividad del agua de mar es el inverso al valor de la conductividad de esta, por lo tanto, podemos deducir que:

Resistividad;

Ecuación 1. Cálculo de la resistividad.

$$\rho = \frac{1}{4S/m} = 0.25 \, \Omega m \quad (1)$$

TIPO DE ROCA O SEDIMENTO	RESISTIVIDAD (Ωm)
Arcilla saturada con agua salobre a salina	< 3
Arcilla saturada con agua salobre a dulce	5-8
Gravas con agua salobre	10-20
Gravas	100-1000
Arena con agua salobre	40-400
Arcilla, arena limosa y gravas	11-25
Agua salobre	1-10
Agua de mar	< 1

Tabla 2. Diferentes tipos de resistividad.

Fuente: [11].

2.1.3. SISTEMAS DE ATERRIZADO.

En el documento IEEE previamente revisado, realizado por Shashidhar y Radhika [12] se estudian tres escenarios de aterrizaje distintos, en beneficio de este trabajo de titulación, para el caso de estudio y tipo de embarcación al cual será futuramente implementado, se optará por el más conveniente.

2.1.4. NORMATIVA.

Para el desarrollo del proyecto de titulación se recopilará una lista de normas y estándares eléctricos marinos definidos para el diseño y construcción de los diferentes sistemas de protección que el mismo aborda.

2.1.4.1. IEC 62305-1: PROTECTION AGAINST LIGHTNING – PART1: GENERAL PRINCIPLES.

Por sus siglas en inglés, esta norma establece los principios generales de protección contra rayos, destaca posibles tipos de daños (funcionales, humanos, eléctricos, estructurales), presenta según niveles una clasificación de sistemas de protección requeridos. Funciona

como base de conceptos para toda la serie IEC 62305, logra dar a comprender los mecanismos de protección y definir el alcance del LPS desde el diseño [14].

2.1.4.2. IEC 62305-2: PROTECTION AGAINST LIGHTNING – PART2: RISK MANAGEMENT.

Esta parte de la norma define el método para la evaluación del riesgo de la embarcación por rayo, incluye cálculo del número de eventos peligrosos, riesgo real y su comparación con el nivel de riesgo permitido, de crucial importancia debido a que nos permite justificar si la embarcación necesita o no de un LPS en base a criterios técnicos, económicos y de seguridad humana [15].

2.1.4.3. IEC 62305-3: PROTECTION AGAINST LIGHTNING – PART3: PHYSICAL DAMAGE TO STRUCTURES AND LIFE HAZARD.

Esta parte de la norma establece requisitos técnicos para diseñar, instalar y verificar el sistema externo de protección contra rayos LPS, aborda lo relacionado con sistemas de captación, bajantes, SPT para disipación de corriente de rayo, equipotencialización y medidas de protección para personas. Clasifica niveles de protección, especifica cómo dimensionar y ubicar cada uno de los componentes del LPS en función del riesgo determinado. La correcta aplicación de esta norma asegura la integridad del sistema y la protección efectiva contra descargas atmosféricas [16].

2.1.4.4. IEC 61643-11: LOW-VOLTAGE SURGE PROTECTIVE DEVICES – PART 11: SURGE PROTECTIVE DEVICES CONNECTED TO LOW-VOLTAGE POWER SYSTEMS – REQUIREMENTS AND TEST METHODS.

Esta norma específica de la familia IEC 61643 establece los requisitos técnicos y métodos de ensayo para los dispositivos de protección contra sobretensiones (SPD) conectados a sistemas eléctricos de baja tensión, con la misma se selecciona los SPD certificados y confiables.

2.1.4.5. IEC 60479-1: EFFECTS OF CURRENT ON HUMAN BEINGS AND LIVESTOCK – PART 1: GENERAL ASPECTS.

Esta norma establece los efectos fisiológicos de la corriente eléctrica sobre seres humanos y animales, considerando distintos valores de corriente, tiempos de exposición y condiciones del entorno. Define:

- Umbrales de percepción, contracción muscular y fibrilación ventricular.
- Curvas tiempo-corriente para corriente alterna (AC) y corriente continua (CC).
- Resistencia del cuerpo humano en condiciones secas y húmedas.
- Valores límite de tensión de contacto (tensión de toque) y tensión de paso.
- Factores de riesgo según el trayecto de la corriente en el cuerpo (mano a pie, mano a mano, etc.) [17].

Esta norma tiene un valor fundamental en ambientes marinos, donde la humedad constante y estructuras metálicas aumentan el riesgo de que una fuga a tierra se convierta en una amenaza real para la integridad de los tripulantes o pasajeros.

2.1.4.6. NTC 4552-1: PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

Norma técnica colombiana basada en IEC 62305 adaptada al contexto latinoamericano la cual establece requisitos generales para LPS, proporciona una validación regional del enfoque normativo IEC y ayuda a contextualizar parámetros técnicos en condiciones similares a las ecuatorianas y el entorno marítimo sudamericano [18].

2.1.4.7. ASTM B843: STANDARD SPECIFICATION FOR ANODES FOR CATHODIC PROTECTION.

Establece los requisitos de composición química, propiedades mecánicas y desempeño de ánodos de sacrificio utilizados en sistemas de protección catódica. La norma asegura que el material utilizado sea adecuado, seguro y efectivo [19].

2.1.4.8. IEEE STD 142 (GREEN BOOK): RECOMMENDED PRACTICE FOR GROUNDING INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS.

Proporciona prácticas recomendadas para el diseño y análisis de sistemas puesta a tierra en instalaciones industriales y comerciales, apoya al diseño SPT de este proyecto incluyendo conexiones de neutro, impedancia de tierra, seguridad en personas y disipación de fallas eléctricas [20].

2.1.4.9. IEEE STD 45: RECOMMENDED PRACTICE FOR ELECTRICAL INSTALLATIONS ON SHIPBOARD.

Estándar técnico para instalaciones eléctricas en embarcaciones, define tipos de conexión de neutro, sistemas de puesta a tierra a bordo, criterios de protección, es una de las más completas normas para aplicaciones navales asegurando que el diseño eléctrico del SPT cumpla con condiciones específicas del entorno marino y de seguridad de buques [21].

2.1.4.10. ABYC E-11: AC AND DC ELECTRICAL SYSTEMS ON BOATS.

Estándar del Consulado Americano de Yates y Botes donde se definen los requisitos para instalaciones eléctrica de AC y DC en embarcaciones de recreo, establece un diseño seguro y funcional del SPT [22].

2.1.4.11. ABYC E-28: GALVANIC ISOLATORS.

Define el uso de aisladores galvánicos para minimizar la corrosión galvánica entre embarcaciones conectadas a redes de tierra comunes como en diques y muelles, protege contra el acelerado deterioro de los componentes metálicos en contacto con el agua de mar en consecuencia a diferencias de potencial con otras embarcaciones [23].

2.1.4.12. ABYC E-2: CATHODIC PROTECTION.

Especifica los requisitos para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de protección catódica mediante ánodos de sacrificio en embarcaciones, es un estándar clave para protección contra corrosión, permite dimensionar y ubicar correctamente los ánodos del SPT y garantizar la integridad estructural del casco, hélices, ejes, timones y demás componentes metálicos sumergidos [24].

2.1.5. CORROSIÓN.

Entendemos por corrosión a la reacción de un metal con respecto al medio que lo rodea, deteriorando sus propiedades fisicoquímicas, el fenómeno ocasiona regiones anódicas y catódicas. La oxidación es considerada una reacción anódica, donde sus electrones se liberan dirigiéndose a regiones catódicas, en esta región se disuelve el metal corroído caso contrario a la región catódica donde se consigue la inmunidad del metal.

La corrosión consiste en el desgaste químico que afecta a un metal, a una aleación metálica o incluso a un material compuesto. Se trata de la degradación del metal originada por una reacción química o electroquímica no deseada, que inicia en su superficie. En términos simples, la corrosión es un proceso de oxidación progresivo y constante. Todos los metales tienen predisposición a oxidarse, aunque algunos lo hacen con mayor facilidad que otros [10].

2.1.6. CORROSIÓN MARINA.

El agua de mar es un conductor eléctrico mucho más eficiente que el agua dulce, lo que provoca que el ritmo de corrosión se incremente notablemente. La única manera de frenar este fenómeno es eliminar completamente la sal y el cloro, ya que incluso una mínima cantidad de sal residual puede mantener activa la reacción. Ciertos metales, como el acero inoxidable, el titanio, el bronce de manganeso y el aluminio anodizado, logran reducir este daño al generar una delgada película de óxido que protege su superficie. Dicho recubrimiento tiene la capacidad de regenerarse en caso de rayaduras, lo que contribuye a disminuir el deterioro.

2.1.6.1. FACTORES AFECTANTES.

En la corrosión atmosférica, el factor predominante no es la contaminación, sino la presencia de humedad ya sea en forma de lluvia, rocío, condensación o niveles altos de humedad relativa (HR). Sin humedad, la mayoría de los contaminantes tendría un efecto insignificante o nulo sobre la superficie metálica. La corrosión se intensifica cuando existen corrientes eléctricas, generalmente pequeñas, derivadas de la “electricidad estática” acumulada en equipos eléctricos, bloques de motor o estructuras metálicas. Asimismo, puede originarse por descargas inesperadas o “cortocircuitos a tierra. En relación con el agua, los aspectos más relevantes son la alcalinidad, la dureza y el nivel de pH, los cuales pueden favorecer o disminuir la corrosión. La interacción entre estos

parámetros determina si el agua provocará incrustaciones, corrosión o si se mantendrá en equilibrio.

2.1.6.2. FACTORES QUE AFECTAN A LA CORROSIÓN.

En conclusión, se identifican seis factores principales que incrementan la velocidad del proceso corrosivo:

- Presencia constante de fugas de corriente: Existen fugas de corriente tanto en AC como en DC, y ambas favorecen la aparición de corrosión. Estas pueden dividirse en intermitentes o permanentes. Las fugas ocasionales suelen originarse por un mal cableado, siendo los conductores sueltos o abiertos la causa más habitual. Cuando estos cables hacen contacto accidental con superficies metálicas, se genera un cortocircuito a tierra. Si la unidad no está conectada correctamente al sistema, se acumula una carga estática en la carcasa metálica, lo que inicia un proceso lento de oxidación entre pares de metales distintos.
- Sistemas de unión y puesta a tierra defectuosos: El sistema de unión y la conexión a tierra constituyen el núcleo de la protección. La durabilidad de una embarcación depende de la calidad de estas conexiones y de la correcta instalación de los ánodos de sacrificio. Este aspecto puede gestionarse fácilmente siguiendo las recomendaciones adecuadas para la selección de los ánodos, en función tanto del material del casco como del tipo de agua en que operará la nave.
- Ausencia o mala instalación de dispositivos de protección: La manera más efectiva de proteger una embarcación contra fugas de corriente provenientes de otras naves o de corrientes indeseadas que ingresan por el conductor de tierra es mediante un aislador galvánico instalado correctamente y verificado periódicamente, según lo indicado en el material de referencia. Para evitar daños por corrosión, es indispensable contar con un aislador galvánico.

2.1.6.3. CORRIENTE PARÁSITA.

Las corrientes parásitas representan una de las principales preocupaciones en el fenómeno de la corrosión. Este tipo de corriente se refiere al flujo de electricidad que circula a través de estructuras, equipos o tierra debido a desbalances en el sistema de suministro eléctrico o a fallos en el cableado.

Cuando un sistema eléctrico no está instalado o mantenido de forma adecuada, la corriente puede desviarse hacia tierra mediante el equipo, el edificio o directamente por el conductor de puesta a tierra. Esta energía circula constantemente entre metales distintos de un mismo dispositivo, intensificando la corrosión galvánica entre pares metálicos. El metal menos noble es el que sufre la erosión, degradándose progresivamente.

2.1.6.4. CORROSIÓN GALVÁNICA.

La corrosión galvánica ocurre cuando los metales se encuentran en contacto con un medio conductor, denominado electrolito, que en las embarcaciones suele ser el agua de mar. Este medio facilita el paso de corriente eléctrica entre diferentes áreas de un mismo metal o incluso entre metales distintos. Cuando los metales están conectados eléctricamente, se generan zonas con diferente potencial eléctrico: ánodos y cátodos, lo que desencadena el proceso corrosivo. En este sistema, la corriente fluye del metal con menor potencial (ánodo) hacia el de mayor potencial (cátodo). El flujo de corriente provoca que el ánodo se deteriore, perdiendo masa debido a la acción de los iones presentes en el electrolito (agua), mientras que el cátodo recibe esa corriente y se mantiene protegido, en la corrosión galvánica, el desgaste de piezas metálicas o elementos adheridos al casco puede controlarse mediante la instalación de ánodos de sacrificio [25].

2.1.6.5. CORROSIÓN ELECTROLÍTICA.

A diferencia de la corrosión galvánica, esta no se origina por la diferencia de potencial entre metales distintos, sino por el paso de corriente alterna o continua a través del mismo metal que compone el casco. Esto ocurre con mayor frecuencia en yates, sobre todo en aquellos con cascos de aluminio o de fibra de vidrio, cuando no se ha realizado una adecuada instalación de los sistemas eléctricos o de control, lo cual puede generar consecuencias graves.

En términos sencillos, la corrosión electrolítica puede entenderse como una corrosión galvánica acompañada por una corriente adicional que circula entre los metales involucrados. Dicha corriente, que generalmente se origina por fugas eléctricas no deseadas, acelera el proceso de corrosión galvánica, provocando que el metal menos noble se degrade rápidamente frente al metal más noble. Si ocurre un error o una falla en el cableado que suministra energía al barco, a los muelles del puerto o a otras naves próximas, puede generarse una diferencia de potencial entre los metales sumergidos. Esto

intensifica la corrosión en las partes metálicas de la embarcación que estén vinculadas a dicho cableado defectuoso. La corrosión electrolítica puede considerarse como un fenómeno oculto que actúa bajo la superficie. Independientemente del tamaño del puerto, cuando las embarcaciones están lo bastante próximas entre sí, los iones se desplazan utilizando el agua de mar como un electrolito ideal. Esto convierte al muelle en una gran celda galvánica. El movimiento iónico ocurre desde el metal más anódico hacia el menos anódico, lo que provoca que las aleaciones más activas se degraden progresivamente, generando erosión en su superficie [26].

2.1.6.6. PROTECCIÓN CATÓDICA.

El mecanismo de la protección catódica consiste en dirigir electrones hacia el metal que se desea resguardar, los cuales provienen de ánodos externos ubicados en puntos estratégicos para cumplir su función. En la práctica, este método puede aplicarse en metales como acero, cobre, plomo, latón y aluminio, protegiéndolos de la corrosión tanto en suelos como en la mayoría de los ambientes acuosos. Es importante destacar que la protección catódica no elimina la corrosión, sino que la traslada hacia los ánodos de sacrificio, evitando así que el deterioro afecte a la estructura principal [25].

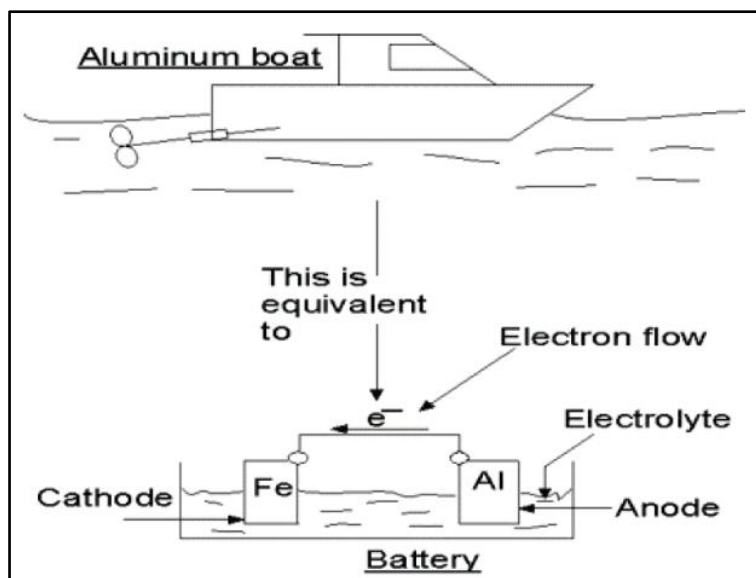


Figura 3. Esquema protección catódica.

Fuente: [26].

Todo sistema de protección catódica requiere de un ánodo, un cátodo, un circuito eléctrico que los conecte y la presencia de un electrolito. Esta técnica no resulta efectiva en

estructuras expuestas al aire, ya que el aire no es un buen electrolito y no permite el flujo de corriente entre ánodo y cátodo [10].

2.1.7. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

Las descargas eléctricas constituyen un fenómeno de transferencia repentina de carga entre dos regiones con diferente potencial eléctrico. Este fenómeno puede manifestarse en diversas formas, como descargas atmosféricas, electrostáticas, de contacto accidental o de arco eléctrico [20]. En el contexto marino y, particularmente, en embarcaciones de gran porte, las descargas atmosféricas en específico los rayos representan la amenaza más significativa debido a su elevada energía y a la interacción directa con las estructuras metálicas del buque.

La interacción entre gotas de agua que ascienden o descienden dentro de las nubes y las corrientes de aire genera la acumulación de una gran cantidad de partículas cargadas eléctricamente, tanto en el interior de las nubes como entre estas y la superficie terrestre. Las diferencias de potencial eléctrico que se forman pueden alcanzar valores cercanos a 100 millones de voltios. Para ponerlo en perspectiva, una línea eléctrica típica opera alrededor de 12000 voltios, lo que significa que la carga en una nube puede ser hasta 8333 veces superior a la de una red eléctrica común. En la base de la nube se concentra carga negativa, lo que induce una carga positiva en la superficie terrestre situada justo debajo. Esta diferencia de cargas opuestas genera un campo eléctrico de gran intensidad, capaz de originar la descarga del rayo [26].

2.1.7.1. NATURALEZA DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

El rayo se origina por la acumulación de cargas eléctricas en las nubes de tormenta donde los procesos convectivos separan cargas positivas y negativas. Cuando la diferencia de potencial supera la rigidez dieléctrica del aire, se produce una descarga en forma de rayo [14]. Los diferentes modos de descarga son:

- Descarga nube-tierra: Es la más peligrosa para infraestructuras y seres vivos, ya que la corriente viaja desde la nube hacia la superficie terrestre o el mar. La corriente de retorno (*return stroke*) puede alcanzar decenas de kiloamperios, liberando gran cantidad de energía en microsegundos[14].

- Descarga nube-embarcación: En el caso de buques y yates, la estructura metálica del casco y, en particular, los mástiles o antenas, actúan como puntos preferenciales de impacto. En mar abierto, donde no existen estructuras más altas alrededor, la embarcación se convierte en un “pararrayos natural” y es altamente susceptible de recibir un impacto directo [21].

Estas modalidades justifican la implementación de un LPS, que asegure una ruta controlada para la corriente de rayo hacia el mar, evitando que la descarga se disipe de forma aleatoria a través de la estructura y de los equipos internos del buque.

2.1.7.2. PROTECCIÓN CONTRA RAYOS PARA EMBARCACIONES A MOTOR.

Se recomienda instalar un mástil corto equipado con un pararrayos. El mástil debe ser metálico para asegurar el correcto funcionamiento del sistema. En caso de utilizar un mástil de metal, este debe conectarse a tierra mediante un conductor calibre 4 AWG, fijado en la base del mástil y enlazado a una fuente de conexión a tierra. Dicha conexión a tierra debe colocarse en un punto seguro y de fácil acceso, preferiblemente en la parte inferior de la embarcación [26].

2.1.8. DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA.

La seguridad en los sistemas eléctricos marinos requiere no solo un adecuado esquema de puesta a tierra y de protección contra rayos, sino también el uso de dispositivos especializados que detectan limita o aíslan condiciones de falla que podrían comprometer tanto a las personas como a los equipos. A continuación, se describen los principales dispositivos de protección que se emplean en embarcaciones, los cuales serán aplicados en el diseño específico en el capítulo 3.

2.1.8.1. DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES (DPS).

Un DPS (Dispositivo de Protección contra Sobretensiones), conocido internacionalmente como SPD (Surge Protective Device), es un equipo diseñado para proteger instalaciones y equipos eléctricos frente a sobretensiones transitorias. Estas sobretensiones pueden originarse por descargas atmosféricas (directas o inducidas) o por maniobras de conmutación en la red eléctrica [27].

El principio de funcionamiento se basa en desviar la sobretensión hacia tierra a través de elementos internos como varistores de óxido metálico (MOV), descargadores de gas o diodos transitorios, en tiempos del orden de nanosegundos. En sistemas marinos, los DPS se instalan principalmente en los tableros de distribución y en los puntos de ingreso de cables externos (alimentación en puerto, líneas de comunicación, etc.).



Figura 4. DPS Acti 9 iPRD 12.5r.

Fuente: [36].

2.1.8.2. AISLADOR GALVÁNICO.

El aislador galvánico es un dispositivo es un dispositivo colocado en la línea de tierra de la conexión de toma de puerto (shore power) diseñado para bloquear corrientes galvánicas de baja tensión y alta frecuencia que circulan entre el sistema de tierra de la embarcación y el sistema del muelle. Estas corrientes, de no ser bloqueadas, podrían generar corrosión en elementos metálicos sumergidos como los pasa casco, hélices, ejes u otras partes expuestas al agua. El aislador galvánico evita que las corrientes de electrólisis circulen a través del conductor de tierra de la conexión de alimentación. Este dispositivo ofrece un aislamiento aproximado de 1,2 voltios, suficiente para bloquear las tensiones electrolíticas provenientes del muelle. Sin embargo, a pesar de esa función, permite el paso de corrientes de seguridad hacia tierra en caso de presentarse un cortocircuito o una fuga eléctrica en la embarcación.



Figura 5. AG ProSafe FS30.

Fuente: [37].

2.1.8.3. IMPORTANCIA DEL AISLADOR GALVÁNICO.

Si la línea de tierra proveniente del cable de alimentación llega contaminada y no hay instalado o el aislador galvánico no funciona correctamente, estas corrientes ingresarán al sistema de unión de la embarcación. Como consecuencia, se contaminarán tanto la barra de tierra de AC como la barra negativa de DC. Este dispositivo debe ser revisado al menos una vez al año siguiendo los procedimientos indicados, ya que después de tormentas intensas puede resultar seriamente dañado. En esos casos, es necesario sustituirlo por otro de igual capacidad en amperios. Es importante recordar que la capacidad del aislador galvánico está directamente relacionada con la del disyuntor principal de la embarcación [10].

2.1.8.4. TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO.

Estos transformadores cuentan con devanados primarios y secundarios que se encuentran separados físicamente mediante un material aislante, como aire, aceite o papel. Gracias a esta separación, no existe conexión eléctrica directa entre los dos devanados, lo que permite aislar los circuitos. Por esta razón, son especialmente útiles en aplicaciones donde se requiere mantener independientes dos redes eléctricas para garantizar seguridad y evitar interferencias. En este tipo de transformador, el devanado de salida permanece aislado y sin conexión a tierra, a menos que se realice dicha conexión durante la instalación. Cuando el neutro del devanado secundario se conecta a tierra, se reduce significativamente el ruido de modo común, lo que garantiza una referencia de neutro a tierra aislada. Esto resulta especialmente útil para equipos electrónicos sensibles. Además, constituye una solución económica frente a la implementación de circuitos

dedicados o actualizaciones eléctricas en las instalaciones. Los transformadores de aislamiento que incorporan escudos de Faraday mejoran la calidad de la energía al reducir las corrientes de ruido de alta frecuencia, proporciona también un aislamiento completo (100%) de la línea de entrada de corriente alterna (AC) [26].



Figura 6. Transformador de aislamiento.

Fuente: [38].

2.1.8.5. MONITORES DE AISLAMIENTO (IMD).

El IMD (Insulation Monitoring Device) es un equipo utilizado en sistemas eléctricos con neutro flotante (esquema IT). Su función es vigilar permanentemente la resistencia de aislamiento entre los conductores activos y la tierra. Cuando esta resistencia cae por debajo de un valor umbral (indicio de fuga a tierra), el IMD emite una alarma y permite al operador actuar antes de que se produzca una segunda falla que pueda interrumpir el suministro o poner en riesgo la seguridad. En el entorno marino, el uso de sistemas IT es común en generadores de baja tensión, y la normativa internacional hace obligatorio el uso de IMD para garantizar la seguridad de las personas y la continuidad del servicio eléctrico.



Figura 7. IM Vigilohm IM400.

Fuente: [39].

2.1.8.6. ANILLOS COLECTORES (SLIP RINGS).

Los anillos colectores (slip rings) son dispositivos electromecánicos cuya función es transferir energía eléctrica o señales entre una parte fija y una parte en movimiento giratorio dentro de una máquina o sistema. Están conformados por uno o más anillos metálicos instalados sobre un eje que rota, y un conjunto de escobillas (normalmente de grafito o de cobre-grafito) que mantienen un contacto constante con la superficie del anillo. Esto asegura la continuidad de la transmisión eléctrica aun cuando existe movimiento rotacional [21]. El anillo colector, conectado al sistema de bonding y de allí a los ánodos de sacrificio, proporciona un camino de baja impedancia hacia el mar, protegiendo los elementos mecánicos y asegurando la continuidad eléctrica de toda la estructura metálica [22].

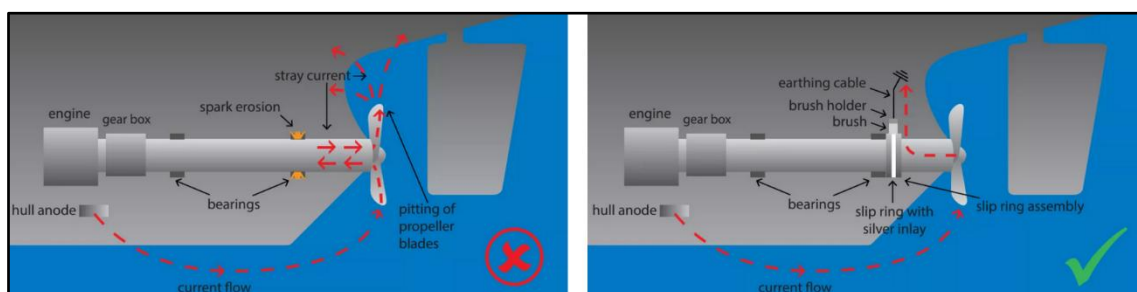


Figura 8. Funcionamiento anillos colectores.

Fuente: [40], [41].

Fuertes corrientes se liberan desde el ánodo hacia el agua de mar circundante, donde buscan la trayectoria de menor resistencia para alcanzar el casco. En estos casos, la hélice representa la superficie metálica más extensa sin recubrimiento, por lo que la corriente tiende a circular a través de ella al ofrecer la resistencia más baja. La correcta instalación de un sistema de puesta a tierra en el eje garantiza que la corriente siga el camino de menor resistencia durante toda la vida útil del sistema, evitando que se descargue en áreas donde pudiera provocar daños [28].

El uso de anillos colectores en sistemas marinos responde tanto a criterios de seguridad eléctrica como de protección catódica. Normativas como ABYC E-11 (Electrical Systems on Boats), IEC 60092-507 (Electrical Installations in Ships – Small Vessels) e IEEE Std 45 (Recommended Practice for Electrical Installations on Shipboard) recomiendan garantizar la conexión equipotencial de todos los componentes metálicos, incluyendo los elementos giratorios. De este modo, los anillos colectores se integran como un dispositivo clave en el SPT, complementando la función de los ánodos de sacrificio y reforzando la protección frente a corrientes erráticas y descargas de rayo.

2.1.8.7. ÁNODOS DE SACRIFICIO Y ELECTRODOS DE DISIPACIÓN EN SISTEMAS MARINOS.

En el ámbito de la ingeniería naval es frecuente el uso del término ánodo para referirse a distintos elementos, cuya función depende del sistema al que pertenecen. Es importante diferenciar entre los ánodos de sacrificio empleados en la protección catódica y los electrodos de disipación utilizados en el LPS, ya que, aunque ambos interactúan con el medio marino, cumplen propósitos técnicos distintos.

2.1.9. FALLA A TIERRA.

Se denomina falla a tierra a la condición anormal en la que un conductor activo (fase o neutro) entra en contacto con la tierra o con partes metálicas conectadas a tierra. En el ámbito marino, estas condiciones suelen manifestarse como fugas a tierra, es decir, corrientes de pequeña magnitud que se desvían por efecto del deterioro del aislamiento, humedad, salinidad o vibraciones. De acuerdo con el Código Eléctrico Nacional (NFPA 70), un potencial igual o superior a 30 voltios en corriente alterna (VAC) representa un peligro. Este nivel de corriente puede ocasionar desde lesiones graves hasta la muerte [26].

2.1.9.1. TOPOLOGÍA DE FALLAS.

- Fugas a tierra: Pequeñas y continuas corrientes de fuga (<300 mA) a causa de bajo o degradado aislamiento.
- Falla L-T: Cuando una de las fases energizadas entra en contacto con tierra (falla más frecuente).
- Falla L-L-T: Dos fases energizadas entran en contacto con tierra.
- Falla L-L-L-T: Las tres fases energizadas entran en contacto con tierra [29].

2.1.10. LIGHTNING PROTECTION SYSTEM (LPS).

Las descargas atmosféricas constituyen uno de los fenómenos naturales más peligrosos para las embarcaciones debido a la elevada corriente y energía que liberan en un intervalo muy corto de tiempo. Un impacto directo de rayo puede producir daños estructurales en el casco, fallas en equipos eléctricos y electrónicos, así como poner en riesgo la seguridad de los pasajeros y tripulación. Incluso descargas indirectas o cercanas generan campos electromagnéticos capaces de inducir sobretensiones en los sistemas eléctricos a bordo [14]. Este sistema comprende el conjunto de medidas, dispositivos y procedimientos que permiten interceptar la descarga atmosférica, conducirla de manera controlada hacia un sistema de puesta a tierra marino y proteger los equipos internos contra sobretensiones inducidas [18].

2.1.10.1. COMPONENTES.

- Captación: dispositivos tales como puntas captadoras, varillas o mástiles diseñados para recibir el impacto directo del rayo.
- Bajantes: conductores que transportan la corriente del rayo desde el punto de captación hasta el sistema de tierra.
- Disipación o puesta a tierra: electrodos o placas sumergidas que permiten derivar la energía al mar de forma segura, evitando trayectorias descontroladas.
- Protección interna: dispositivos de protección contra sobretensiones (SPD/DPS) instalados en los tableros eléctricos para limitar los impulsos de tensión y proteger equipos electrónicos sensibles [30].

2.1.10.2. IMPORTANCIA EN AMBIENTE MARINO.

En el caso de embarcaciones, la necesidad de un LPS se justifica por tres factores principales:

- La operación continua en mar abierto, sin estructuras cercanas que reduzcan el riesgo de impacto.
- La presencia de mástiles, antenas y superestructuras que incrementan la probabilidad de atracción de rayos.
- El alto valor económico y crítico de los sistemas eléctricos y de navegación, cuya falla puede comprometer la seguridad de la operación.

En consecuencia, el diseño de un LPS adecuado no solo constituye una medida de seguridad eléctrica, sino también un requisito indispensable para la protección de la vida humana, la preservación de activos y la continuidad operativa en embarcaciones modernas.

2.1.11. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT).

El sistema de puesta a tierra constituye el conjunto de elementos conductores que conectan intencionalmente las masas metálicas y ciertos puntos del sistema eléctrico con el terreno o, en el caso de una embarcación, con el casco y los ánodos de sacrificio en contacto con el agua de mar. Su propósito principal es garantizar la seguridad de las personas, la protección de equipos y la adecuada operación del sistema eléctrico [20], [22].

Desde un punto de vista funcional, el SPT cumple cinco roles fundamentales:

- Mitigación de corrosión: cuando diferentes partes metálicas conformantes de una embarcación están en contacto con el agua de mar, pueden generarse pares galvánicos que aceleran la corrosión de los metales más nobles.
- Protección de equipos: proporciona un camino de baja impedancia para derivar corrientes de falla y sobretensiones, reduciendo daños en equipos eléctricos y electrónicos.
- Estabilidad del sistema eléctrico: establece una referencia común de potencial, reduciendo diferencias peligrosas de tensión entre partes metálicas.
- Facilitación de la operación de protecciones: permite que fusibles, disyuntores y relevadores detecten rápidamente corrientes de falla y actúen de forma selectiva.

En embarcaciones marinas, el sistema de puesta a tierra se adapta a las particularidades del entorno: el agua de mar actúa como electrolito, los ánodos de sacrificio cumplen la doble función de control de corrosión y electrodo de puesta a tierra, y las normas navales

[24], [21] establecen criterios específicos para el diseño y dimensionamiento de los conductores y electrodos.

2.1.11.1. ENLACE DE UNIÓN (BONDING).

El enlace de unión corresponde a la conexión eléctrica entre las partes metálicas expuestas que no conducen corriente, las cuales se enlazan a una barra conductora denominada barra de unión (*bonding conductor*). Este sistema está compuesto por conductores que, aunque no transportan corriente normalmente, se encargan de conectar los elementos metálicos a la barra de unión. Dicha barra, fabricada usualmente en bronce naval, se extiende de proa a popa a lo largo de la línea central de la embarcación (*stringers*). A ella se conectan todos los conductores de unión provenientes de los equipos y componentes metálicos con el fin de:

- Garantizar una ruta de baja impedancia hacia tierra en caso de falla, lo que permite que un dispositivo de protección del circuito se active correctamente.
- Prevenir la presencia de tensiones peligrosas en superficies metálicas. Esto puede suceder si existe un defecto en el aislamiento de un cable, lo que ocasiona que la corriente circule a través de partes metálicas que no están conectadas a tierra.
- Brindar un camino de descarga para corrientes galvánicas y corrientes parásitas de DC.

Los conductores empleados suelen ser de color verde en el sistema americano, o verde con franjas amarillas en el sistema europeo.

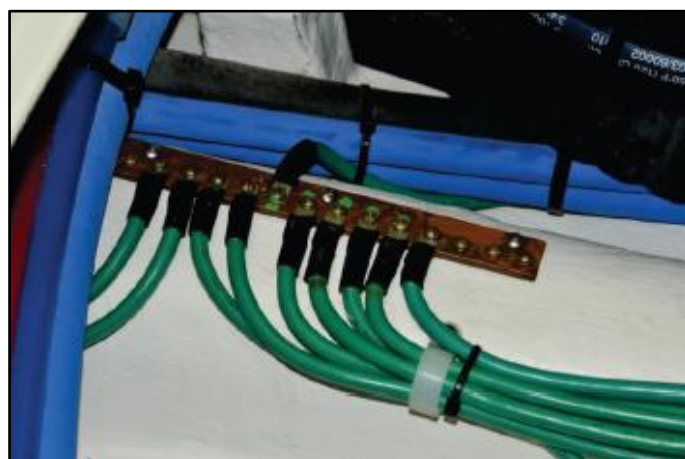


Figura 9. *Bonding bus bar.*

Fuente: [26].

2.1.11.2. PUESTA A TIERRA (GROUNDING).

En una embarcación, la puesta a tierra se entiende como el potencial o tensión existente en el agua donde se encuentra sumergido el barco, en relación con el sistema de unión y los ánodos de sacrificio [25].

La puesta a tierra (*grounding*) se entiende como una conexión directa y común hacia tierra, cuyo propósito principal es:

- Conducir las descargas eléctricas de los rayos hacia el suelo, evitando que ocasionen daños a personas, equipos o instalaciones.
- Disminuir interferencias de origen estático y de radiofrecuencia (RF), lo que contribuye a mejorar el desempeño de los dispositivos electrónicos.

2.1.11.3. ENLACE DE UNIÓN Y PROTECCIÓN CATÓDICA.

Como se mencionó con anterioridad, la protección catódica es un método empleado para evitar la corrosión en metales, conectando la estructura a proteger con un ánodo de sacrificio, es decir, un metal más electronegativo que se corroe en lugar del material protegido. En embarcaciones, los elementos en contacto con el agua como motores, generadores, timones y accesorios del casco se enlazan a una barra común, la cual se conecta a un ánodo de sacrificio colocado en el agua, en la parte externa del barco.

Además, se pueden instalar ánodos de zinc adicionales en transmisiones, motores fuera de borda, timones, quillas y skegs, lo que brinda un refuerzo extra contra la corrosión. La barra común se conecta al ánodo externo mediante pernos fijados al casco, garantizando una unión eléctrica confiable entre el bus de unión y el ánodo.



Figura 10. Grounding, protección catódica.

Fuente: [26].

2.1.11.4. PUNTOS DE REFERENCIA CONECTADOS AL ENLACE DE UNIÓN.

- Motores y sistemas de transmisión.
- Hélices junto con sus ejes.
- Gabinetes destinados a equipos electrónicos.
- Tableros eléctricos y cajas de control.
- Tanques metálicos de combustible y agua, además de bombas y válvulas eléctricas de combustible.
- Cajas metálicas de baterías.
- Conductos o recubrimientos metálicos de protección.
- Solapas con pestañas de fijación. [26].

2.1.11.5. TENSIONES DE SEGURIDAD.

En el diseño de un SPT resulta fundamental garantizar no solo la adecuada dispersión de corrientes de falla o descargas atmosféricas, sino también la seguridad de las personas y equipos que se encuentren en contacto con la embarcación. Para evaluar esta condición se consideran las tensiones de toque y de paso, parámetros que determinan el riesgo eléctrico bajo condiciones de falla.

3. CAPÍTULO III.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO.

La presente investigación se centra en el análisis y diseño de sistemas de protección eléctrica aplicados a una embarcación tipo yate de recreo de 39 metros de eslora, construido en acero naval y destinado a la operación de cruceros en las Islas Galápagos-Ecuador. Este tipo de embarcación tiene un papel fundamental en la actividad turística de la región, lo que exige altos estándares de seguridad eléctrica, tanto para preservar la integridad de sus ocupantes como para garantizar la confiabilidad de sus equipos a bordo.

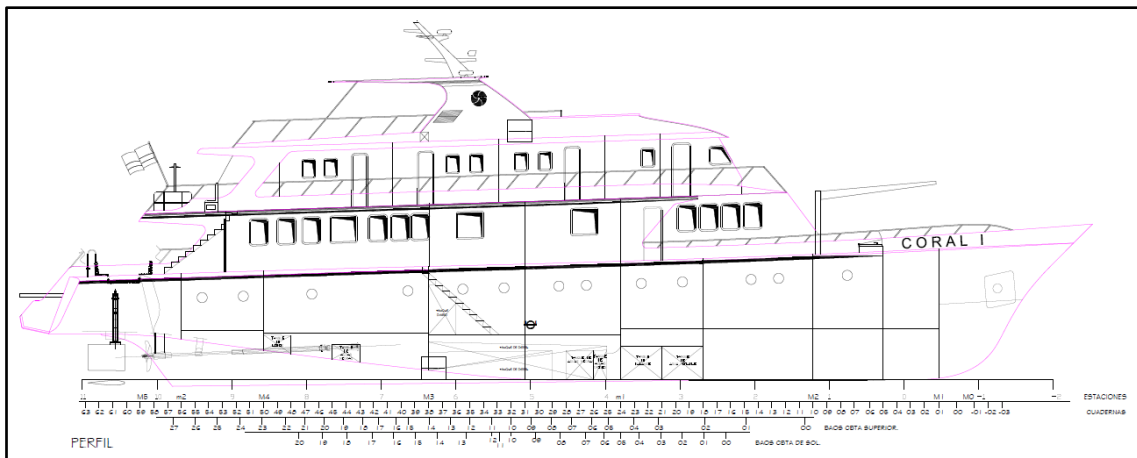


Figura 11. Embarcación para el estudio.

Fuente: El autor.

3.1.1. GENERALIDADES.

El yate cuenta con una capacidad total de 32 personas, distribuidas en 25 pasajeros y 7 tripulantes. Su operación es continua, grupos electrógenos trabajan las 24 horas del día y sus máquinas un rango de 10 horas diarias, lo que incrementa la exigencia sobre los sistemas eléctricos de a bordo. El valor de los equipos eléctricos y electrónicos instalados asciende aproximadamente a USD 250.000, lo cual representa una inversión significativa que requiere medidas de protección adecuadas.

3.1.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.

Las características técnicas de la embarcación permiten comprender el alcance del estudio. Entre ellas se destacan:

- Dimensiones: eslora de 39 m, que la ubica fuera de la clasificación de “embarcación pequeña” según ISO 8666:2020 (≤ 24 m).

DIMENSIONES.		DATOS EN L.A. DISEÑO.	
ESLORA TOTAL, L.	39.07 m.	LCB.	0.83 m.
MANGA TOTAL, B.	8.54 m.	KB.	1.29 m.
PUNTAL A CBTA PRINCIPAL, Dp.	4.21 m.	SM.	267.0 m ²
PUNTAL A CBTA SUPERIOR, Ds.	6.47 m.	Cp.	0.715
PUNTAL A CBTA DE SOL, Dss.	8.82 m.	Cw.	0.774
CALADO MOLDEADO, T.	2.00 m.	Bwl:	8.28 m.
DESPLAZAMIENTO, Δ.	255.01 TON.	Lwl.	34.79 m.
VOLUMEN DE CARENA V.	249.00 m ³	Aw.	223 m. ²
VOLUMEN DE CASCO.	782.00 m ³	LCF.	-1.81 m.
VOLUMEN DE SUPERESTRUCTURA	603.00 m ³	TP I.	228.90 TON/m.
TRB	364.02	BML.	65.8 m.
		BMT.	3.91 m.
		KML.	67.1 m.
		KMT.	5.21 m.
		MT I	616.6 TON-m/m.

Figura 12. Características generales de la embarcación.

Fuente: El autor.

- Material de construcción: casco de acero naval, lo que implica condiciones específicas de corrosión y conducción eléctrica.
- Sistema de propulsión: la embarcación cuenta con dos motores principales marca Scania, los cuales transmiten potencia mecánica directamente a los ejes propulsores acoplados a dos hélices. Este sistema constituye la base de la movilidad del yate, garantizando el desplazamiento en las rutas turísticas de las Islas Galápagos.



Figura 13. Motor de propulsión Scania.

Fuente: [43].

- Sistema de generación eléctrica: de manera independiente al sistema de propulsión, la nave dispone de dos grupos electrógenos Caterpillar de 100 kVA cada uno, que suministran energía a todos los sistemas eléctricos y electrónicos

de a bordo. Estos generadores no trabajan en paralelo, sino que operan de forma alternada para garantizar continuidad en el servicio eléctrico.



Figura 14. Grupo electrógeno Caterpillar.

Fuente: [44].

- Sistema eléctrico de a bordo: red trifásica de 110–220 V, distribuida a través de un tablero principal y nueve tableros secundarios que alimentan alumbrado, climatización, servicios auxiliares, cocina, bombas de seguridad y sistemas de navegación y comunicación.
- Conexión de los generadores: la conexión del generador está dada por 12 terminales con la siguiente configuración en estrella: 1–7, 2–8, 3–9, 10–11–12–4–5–6, lo que permite un sistema trifásico con neutro accesible.

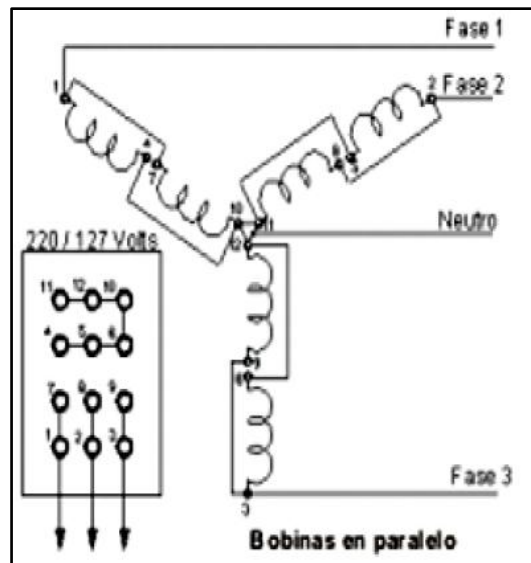


Figura 15. Conexión estrella en generador.

Fuente: [25].

Cabe resaltar que, en la situación actual, el tablero principal no cuenta con una barra de tierra (bonding bus bar), limitándose únicamente a barras de fase (L1, L2, L3) y neutro (N). Adicionalmente, los tableros secundarios no reciben un conductor de protección (PE) proveniente del tablero principal, sino que son aterrizados directamente al casco metálico de la embarcación. Este esquema, aunque funcional, no es recomendable, ya que puede generar diferencias de potencial entre tableros, corrientes parásitas que aceleran la corrosión y una actuación deficiente de dispositivos modernos de protección (como DPS, monitores de aislamiento o relés de fuga).

3.1.3. ESTADO DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA ACTUAL:

En la situación actual, la embarcación no cuenta con sistemas de seguridad eléctrica adecuados frente a fenómenos naturales o fallas internas. En particular:

- No posee un LPS, lo que la hace vulnerable a descargas atmosféricas directas o inducidas.
- Carece de un SPT que asegure la disipación controlada de corrientes de falla o sobretensiones.
- No dispone de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS o SPD), recomendados por normas como IEC 61643.

- No se han implementado monitores de aislamiento (IMD) ni relés de fuga a tierra, elementos esenciales en sistemas eléctricos de neutro flotante o de baja tensión en ambientes marinos.
- La ausencia de un bonding bus bar en el tablero principal y la práctica de aterrizar tableros secundarios directamente al casco incrementan los riesgos de seguridad eléctrica y de corrosión.

3.1.4. JUSTIFICACIÓN DE ESTUDIO.

La selección de este objeto de estudio se justifica por las siguientes razones:

- Condiciones del entorno marino: el agua salada constituye un electrolito altamente conductor, lo que incrementa los riesgos de corrosión y fugas de corriente.
- Exposición a descargas atmosféricas: por su altura y ubicación en mar abierto, la embarcación está expuesta a impactos de rayo directos e indirectos.
- Seguridad de las personas: proteger a los 32 ocupantes es prioridad, ya que las tensiones de paso y de toque pueden representar un riesgo letal en ausencia de un sistema de puesta a tierra adecuado.
- Protección de equipos de alto valor: la falla de un tablero eléctrico, un generador o los sistemas de control podría generar pérdidas económicas significativas.
- Cumplimiento normativo: estándares como IEC 62305 (protección contra rayos), IEEE Std 45 (prácticas eléctricas en buques) y ABYC E-11 (instalaciones eléctricas en embarcaciones) establecen la necesidad de contar con sistemas de protección específicos en este tipo de entornos.

En conjunto, estas características convierten a la embarcación en un objeto de estudio idóneo para el diseño de un sistema integral de protección eléctrica, que incluya un LPS, un SPT y dispositivos de protección complementarios. La incorporación de un *bonding bus bar* en el tablero principal y la implementación de líneas de tierra dedicadas hacia cada tablero secundario resultan indispensables para garantizar la seguridad eléctrica, minimizar la corrosión y cumplir con la normativa internacional vigente.

3.1.5. DISEÑOS UNIFILARES DE LA EMBARCACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.

El yate cuenta con sus propios diagramas unifilares para el sistema de generación, en la figura 16 se logra visualizar el Diagrama Unifilar General en el cual se detalla los generadores 1 y 2 con sus respectivos datos técnicos como son, tensión, potencia y conexionado. Además, se visualiza el conexionado de los transformadores de medición en este caso los transformadores de corriente que mantienen una relación de 300/5 amperios, y estos están conexionados al medidor de energía para monitorear el estado del consumo de cada uno de los generadores.

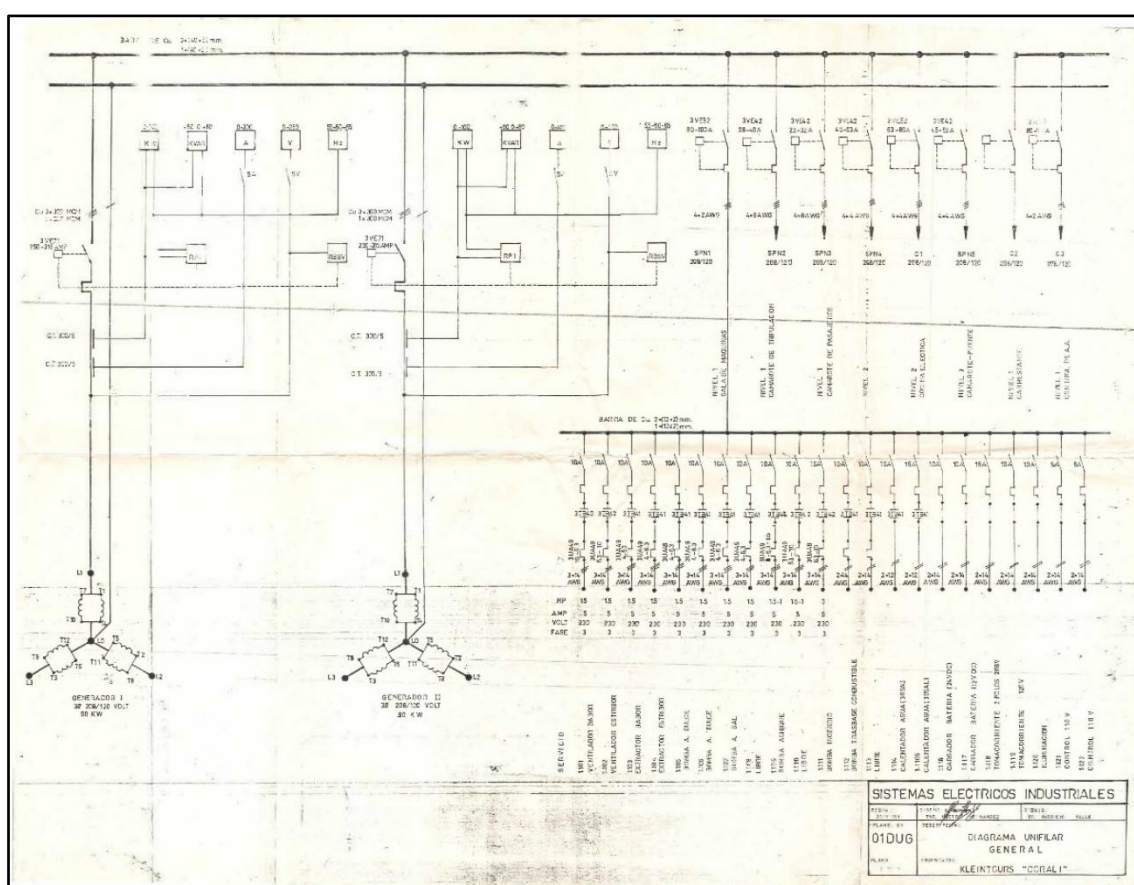


Figura 16. Diagrama Unifilar General Plano 01DUG.

Fuente: El Autor.

En la figura 17 se detalla el Panel 12 V. DC “Sala de Máquinas” el cual está conformado por su banco de batería, su respectivo cargador y las cargas entre ellas; iluminación y arranque de motores. Por otro lado, en la figura 18 se especifica el Panel 12 V. DC “PUENTE” en este plano se da a conocer el puente que existe en el sistema eléctrico,

además se especifica el convertidor 110 V AC/12 VDC con el fin de alimentar las demás cargas del yate, entre ellas; luces de navegación, reflectores, radares y entre otros.

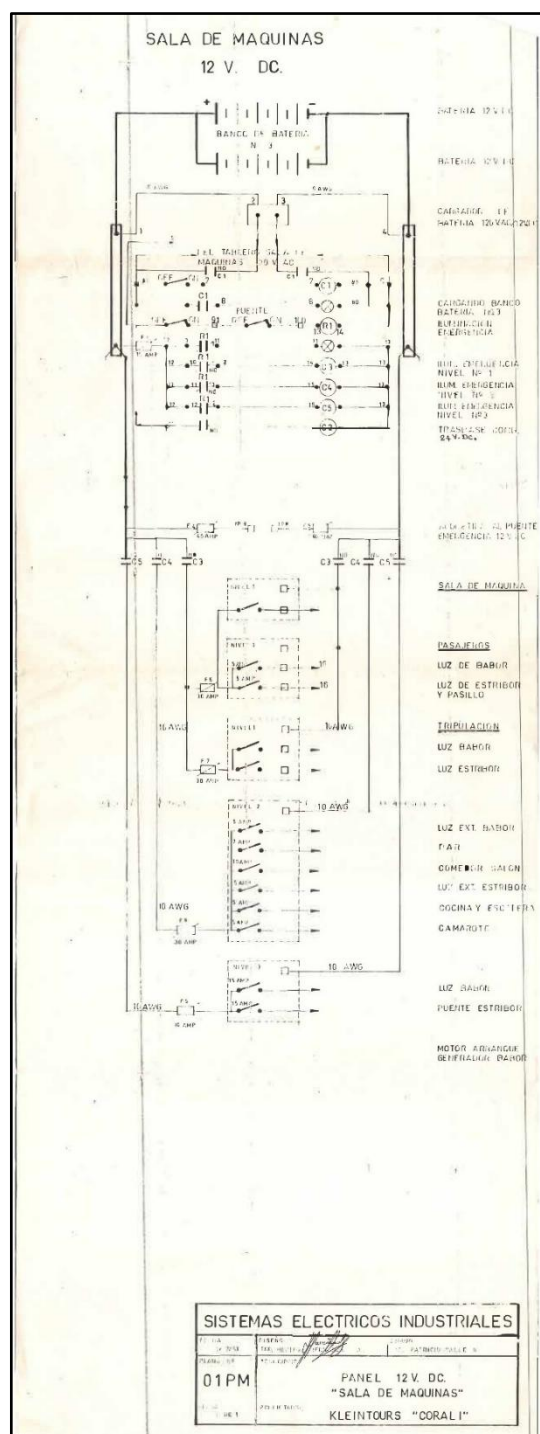


Figura 17. Panel 12 V. DC "Sala de Máquinas" Plano 01PM.

Fuente: El Autor.

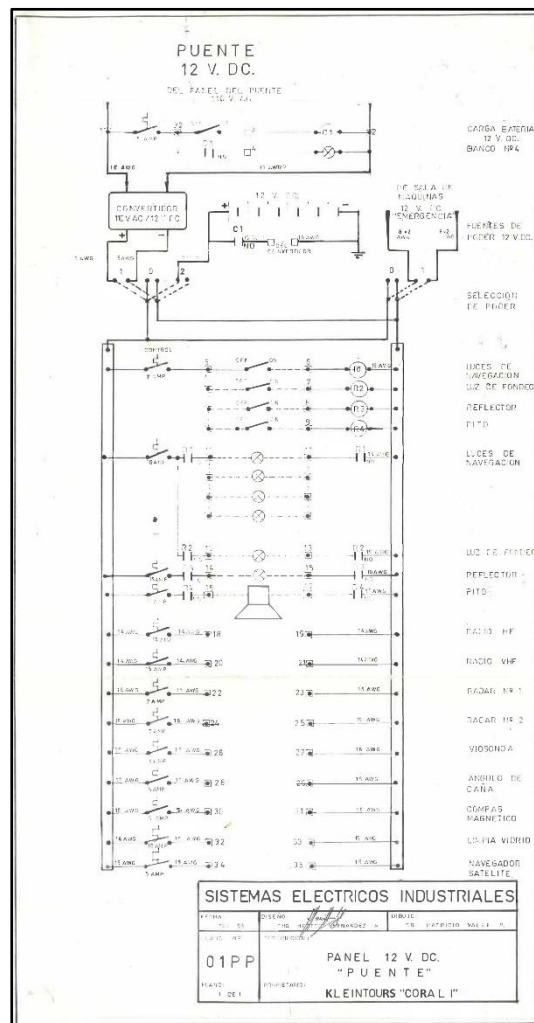


Figura 18. Diagrama Unifilar General Plano 01PP.

Fuente: El Autor.

4. CAPÍTULO IV.

4.1. ANÁLISIS DEL TRABAJO.

4.1.1. CÓDIGO EN MATLAB.

```

clc, clearvars, close all
%% PRESENTACIÓN Y DATOS PRINCIPALES.
fprintf(' Código de cálculos para trabajo de titulación: \n');
fprintf(' "DISEÑO DEL SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA EMBARCACIÓN DE TURISMO TIPO YATE CON CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE 75 KW CONSIDERANDO FRECUENCIAS DE TIPO INDUSTRIAL Y RAYO" \n');
fprintf(' " UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL CARRERA DE ELECTRICIDAD. " \n');
fprintf(' Autor: Eric Alberto Jurado Bravo. \n');
fprintf(' Tutor: Ing. Roy Freddy Santana Jara, MSc. \n');
fprintf(' Código con derechos de autor y propiedad de la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL. \n');
%% NORMATIVAS:
% Norma / Estándar: IEC 62305 (Partes 1–4)
fprintf('Norma / Estándar: IEC 62305 (Partes 1–4). \n');
fprintf('Regula: Protección contra rayos: principios, evaluación de riesgo, diseño de captadores, bajantes y medidas internas. \n');
fprintf('Aplicado a: Cálculo de riesgo (Nr), nivel de protección (LPL), diseño de captadores y bajantes (Cap. 5.4 y 5.6). \n');
% NTC 4552-1
fprintf('Norma / Estándar: NTC 4552-1. \n');
fprintf('Regula: Sistemas de protección contra rayos (referencia regional latinoamericana). \n');
fprintf('Aplicado a: Validación de área de captura y riesgo, complementa IEC 62305 (Cap. 5.4). \n');
% IEEE Std 45
fprintf('Norma / Estándar: IEEE Std 45. \n');
fprintf('Regula: Prácticas recomendadas para instalaciones eléctricas en embarcaciones. \n');
fprintf('Aplicado a: Organización de tableros, bonding bus bar, selección de conductores de tierra (Cap. 5.5). \n');
% IEEE Std 142 (Green Book)
fprintf('Norma / Estándar: IEEE Std 142 (Green Book). \n');
fprintf('Regula: Puesta a tierra en sistemas eléctricos de baja tensión. \n');
fprintf('Aplicado a: Dimensionamiento de conductores de tierra, esquemas de neutro IT/TT/TN, corrientes de falla (Cap. 5.4 y 5.5). \n');
% ABYC E-11
fprintf('Norma / Estándar: ABYC E-11. \n');
fprintf('Regula: Sistemas eléctricos AC y DC en embarcaciones. \n');
fprintf('Aplicado a: Cableado, tableros, protecciones y seguridad del personal (Cap. 5.7). \n');
% ABYC A-28
fprintf('Norma / Estándar: ABYC A-28. \n');
fprintf('Regula: Aisladores galvánicos. \n');
fprintf('Aplicado a: Protección contra corrientes galvánicas en conexión a muelle (Cap. 5.7). \n');
% ABYC E-2
fprintf('Norma / Estándar: ABYC E-2. \n');
fprintf('Regula: Protección catódica en embarcaciones. \n');
fprintf('Aplicado a: Dimensionamiento, selección y ubicación de ánodos de sacrificio (Cap. 5.5). \n');
% ASTM B843
fprintf('Norma / Estándar: ASTM B843. \n');
fprintf('Regula: Especificaciones de materiales para ánodos de protección catódica (Mg, Zn, Al). \n');
fprintf('Aplicado a: Selección de materiales y calidad de ánodos en ambiente marino (Cap. 5.5). \n');
% IEC 61643 / 61643-11
fprintf('Norma / Estándar: IEC 61643 / 61643-11. \n');
fprintf('Regula: Dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS). \n');
fprintf('Aplicado a: Selección y coordinación de DPS en tableros principales y secundarios (Cap. 5.7). \n');
% IEC 61557-8
fprintf('Norma / Estándar: IEC 61557-8. \n');
fprintf('Regula: Monitores de aislamiento (IMD) para sistemas IT. \n');
fprintf('Aplicado a: Selección e integración de IMD en sistema con neutro flotante (Cap. 5.7). \n');
% IEC 60364-4-41
fprintf('Norma / Estándar: IEC 60364-4-41. \n');
fprintf('Regula: Medidas de protección contra choques eléctricos. \n');
fprintf('Aplicado a: Validación de tensiones de toque y paso, selección de protecciones diferenciales (Cap. 5.4 y 5.5). \n');
% IEC 60479-1
fprintf('Norma / Estándar: IEC 60479-1. \n');
fprintf('Regula: Efectos fisiológicos de la corriente sobre el cuerpo humano. \n');
fprintf('Aplicado a: Fundamentación de los cálculos de seguridad: toque, paso y gradientes (Cap. 5.4). \n');
%% CÁLCULOS.
fprintf('5.1.4.1. Área de captura equivalente y número anual de descargas (IEC62305-2). \n');
L=39; % Longitud en metros (m).
W=8.54; % Manga en metros (m).
H= 12; % Altura en metros (m).
Ng=12; % Impactos / Km^2 año.
A_eq=(L*W + 2*L*H + 2*W*H + pi*H.^2);
fprintf('Área de captura equivalente (metros cuadrados): A_eq = %.2f. \n', A_eq);

```

```

%
Ne=(Ng*(A_eq/(10^6)));
fprintf('Número anual de descargas directas sobre embarcación: Ne = %.5f. \n',Ne);
%
T=(1/Ne);
fprintf('Tiempo promedio entre descargas (año/impacto): T = %.1f. \n',T);
%
fprintf('5.1.4.2. Evaluación del riesgo de descargas atmosféricas (IEC62305-2). \n');
fprintf(' P= probabilidad de daño dado un impacto (0-1). \n');
fprintf(' L= fracción de pérdida cuando ocurre el daño (0-1). \n');
fprintf(' Riesgos y tolerables IEC: \n');
fprintf('5.1.4.2.1. Escenario A (estado actual, sin LPS, DPS, IMD). \n');
P1=1;
L1=0.15;
R1A=(Ne*P1*L1);
fprintf('Escenario A: R1A = %.6f NO CUMPLE. \n',R1A);
%
Vsens1=250000;
P4=1;
L4=0.35;
R4A_sens=(Ne*P4*L4);
fprintf('Escenario A: R4A_sens = %.6f NO CUMPLE. \n',R4A_sens);
%
EAL=(R4A_sens*Vsens1);
fprintf('Pérdida anual esperada (EAL) = %.4f USD/año. \n',EAL);
%
VTot=2500000;
PT=1;
LT=0.15;
R4ATot=Ne*PT*LT;
fprintf('Escenario 4A Total: R4ATot = %.6f NO CUMPLE. \n',R4ATot);
%
EAL4=(R4ATot*Vsens1);
fprintf('Pérdida anual esperada (EAL4) = %.4f USD/año. \n',EAL4);
fprintf('EN EL ESCENARIO ACTUAL, R1 Y R4 SUPERAN LOS LÍMITES TOLERABLES, ES OBLIGATORIO IMPLEMENTAR MEDIDAS. \n');
%
fprintf('5.1.4.2.2. Escenario B (Diseño propuesto). \n');
P1B=0.15;
L1B=0.03;
R1B_Mod=(Ne*P1B*L1B);
fprintf('Escenario B (Diseño propuesto): R1B_Mod = %.6f AÚN NO CUMPLE. \n',R1B_Mod);
%
P1B_Fuerte=0.10;
L1B_Fuerte=0.02;
R1B_Fuerte=(Ne*P1B_Fuerte*L1B_Fuerte);
fprintf('Escenario B (Diseño propuesto): R1B_Fuerte = %.8f AÚN NO CUMPLE. \n',R1B_Fuerte);
%
fprintf('Meta de cumplimiento (requerida por R_T1). \n');
fprintf('El producto P*L debe satisfacer: \n');
RT_Definitiva=1*10^-5;
P_Definitiva=RT_Definitiva/Ne;
fprintf('Escenario B (Mejora definitiva): P_Definitiva = %.5f. \n',P_Definitiva);
%
PM_Definitiva=0.04;
LM_Definitiva=0.01;
R1B_Definitiva=(Ne*PM_Definitiva*LM_Definitiva);
fprintf('Escenario B (Diseño Definitivo): R1B_Definitiva = %.8f SÍ CUMPLE. \n',R1B_Definitiva);
%
fprintf('R_4 pérdidas económicas. \n');
P4_perdidas=0.10;
L4_perdidas=0.05;
R1B_Def=(Ne*P4_perdidas*L4_perdidas);
fprintf('Escenario B (Diseño Definitivo): R1B_Def = %.7f SÍ CUMPLE RT4. \n',R1B_Def);
%
EAL_sensibles=R1B_Def*Vsens1;
fprintf('EAL sensibles: EAL_sensibles = %.2f USD/año. \n',EAL_sensibles);
%
EAL_total=R1B_Def*VTot;
fprintf('EAL total: EAL_total = %.f USD/año. \n',EAL_total);
%
fprintf('5.1.4.3.1. Elección LPL. \n');
Ng_LPL=Ng; % Impactos / Km^2 año.
fprintf('Impactos / Km^2 año: Ng_LPL = %.f. \n',Ng_LPL);
r=20; % metros.

```

```

fprintf('Radio esfera: r = %.f m. \n',r);
I_imp=200; % kA.
fprintf('Corriente de impacto: I_imp = %.f kA. \n',I_imp);
%
fprintf('5.1.4.3.2. Cobertura por método de la esfera rodante. \n');
h=3; % metros.
dh=sqrt((2*r*h)-(h.^2));
fprintf('Radio aproximado para cobertura de esfera rodante: dh = %.2f m. \n',dh);
%
fprintf('5.1.4.3.3. Distancia de separación (IEC62305-3). \n');
fprintf(' En la práctica marina se adopta separación física  $\geq 10\text{-}50\text{mm}$ . \n');
%
fprintf('5.1.4.3.4. Electrodo de descarga al mar del LPS. \n');
fprintf(' Comportamiento a 50/60Hz (frecuencia industrial). \n');
A_lps=0.09; % m^2.
rho_agua=0.20; % ohms por metros.
a=sqrt(A_lps/pi);
fprintf('Radio equivalente: a = %.3f m. \n',a);
%
R_60Hz=rho_agua/(4*a);
fprintf('Resistencia en frecuencia de 60 Hz: R_60Hz = %.3f ohms. \n',R_60Hz);
%
l=12; % metros
w=3;
%L_Inductancia=2*(10.^-7)*l*(log(2*l/w)+0.5);
L_Inductancia=17.2*10^-6;
fprintf('Inductancia aproximada de una cinta recta (H): L_Inductancia = %.7f H. \n',L_Inductancia);
%
f=100*10^3; % KHz.
XL=2*pi*f*L_Inductancia;
fprintf('Reactancia inductiva: XL = %.2f ohms. \n',XL);
%
fprintf('5.1.4.3.5. Sección mínima de captador y bajante (LPL I). \n');
fprintf('• Captador: material de acero inoxidable o bronce naval con buena resistencia mecánica y a la corrosión, según IEC62305-3 y ABYC A-28 se utiliza \n');
fprintf(' punta franklin o varilla de  $\geq 16\text{mm}$  de diámetro si es cobre o  $\geq 10\text{mm}$  si es acero inoxidable, longitud  $\geq 0.3\text{m}$  por encima de la estructura a proteger. \n');
fprintf('• Bajante: material de cobre estañado, 2 bajantes en paralelo, una por babor y otra por \n');
fprintf(' estribor, sección mínima  $25*3\text{mm}$  ( $75 \text{ [mm]}^2$ ), se recomienda  $30*3\text{mm}$  ( $90 \text{ [mm]}^2$ ). \n');
%
fprintf('5.1.4.3.6. Diseño preliminar del LPS. \n');
fprintf('• Captador principal en la antena de mayor altura. Asegurar h efectivo  $\geq 3\text{m}$  sobre los puntos críticos para lograr d(h) $\geq 10\text{-}12\text{m}$ . \n');
fprintf('• Doble bajante recta desde el captador hasta sala de máquinas, con cinta Cu estañada  $30*3 \text{ mm}$ , ruta propia. \n');
fprintf('• Placa de descarga del LPS:  $300*300*3 \text{ mm}$  (o dos placas en paralelo si quieres margen), montada en casco siempre sumergido \n');
fprintf(' en sector de sala de máquinas; conexión directa y corta desde la bajante. \n');
fprintf('• Integración equipotencial: conexión a barra equipotencial principal; NO mezclar con ánodos de protección catódica del SPT. \n');
fprintf('• Medidas EMC: evitar lazos, mantener rutas rectas, cruces a  $90^\circ$ , y separar la bajante de cables de señal/potencia. \n');
%
fprintf('5.1.4.4. Diseño sistema puesta a tierra (SPT). \n');
fprintf('5.1.4.4.1. Dimensionamiento de ánodo de sacrificio. \n');
fprintf(' Datos base de la embarcación: \n');
LWL=34.79; % metros.
BWL=8.28; % metros.
T_emb=2; % metros.
Aw=223; % metros cuadrados.
fprintf(' Superficie mojada WSA. \n');
Cwsa=0.90;
WSA=Cwsa*LWL*(BWL+T_emb);
fprintf(' Superficie mojada WSA = %.f m^2. \n',WSA);
fprintf(' Factor de pintura. \n');
F_inic=0.05;
AF_inic=WSA*F_inic;
fprintf(' Fracción Inicial AF_inic = %.1f m^2. \n',AF_inic);
fprintf(' Fin de ciclo. \n');
F_mant=0.20;
AF_mant=WSA*F_mant;
fprintf(' Fracción Final AF_mant = %.1f m^2. \n',AF_mant);
%
fprintf('Densidad de A por m^2. \n');
fprintf('• Fase inicial: después de dique, casco recién pintado, poca área descubierta (0.05), mucha demanda de A por m^2 (0.10-0.20A/m^2) por pequeñas áreas desnudas. \n');

```

```

fprintf('• Fase de mantenimiento: después de los primeros 6 meses de operación, pintura en deterioro, mayor área descubierta, poca
demanda de A por m^2 (0.01-0.02A/m^2) gracias al biofilm y anticorrosivo de la pintura. \n');
J_inic=0.15; % A/m^2.
I_inic=J_inic*AF_inic;
fprintf(' Densidad de A I_inic = %.3f A. \n',I_inic);
J_mant=0.015; % A/m^2.
I_mant=J_mant*AF_mant;
fprintf(' Densidad de A I_mant = %.3f A. \n',I_mant);
%
fprintf('Ponderación para un tiempo de 3 años (tiempo de operación en mar abierto). \n');
Id=I_inic*0.25 + I_mant*2.75;
fprintf('Ponderación para un tiempo de 3 años Id = %.3f año. \n',Id);
Q=Id*8760;
fprintf('Ponderación para un tiempo de 3 años en horas Q = %.f Ah. \n',Q);
%
fprintf('Masa de ánodo necesaria (material y factores). \n');
Cap=780; % Ah/Kg.
n_efi=0.95; % Tipo 1.
u=0.85; % Utilización.
m_zn=Q/(Cap*n_efi*u);
fprintf('Masa de ánodo necesaria m_zn = %.1f Kg. \n',m_zn);
fprintf('Margen de diseño (10-20 por ciento) 50-55 Kg como objetivo práctico. \n');
%
fprintf('Cantidad, distribución e impedancia de ánodos. \n');
rho_mar=0.20; % ohms metros.
conductividad=1/rho_mar;
fprintf('Conductividad = %.f Sm. \n',conductividad);
fprintf('Placa 300*100*40. \n');
fprintf('Frecuencia industrial (50/60 Hz). \n');
Area=0.03; % metro cuadrado.
radio_equi=sqrt(Area/pi);
fprintf('Radio equivalente radio_equi = %.3f m. \n',radio_equi);
%
fprintf('Resistencia de dispersión. \n');
R1=rho_mar/(4*radio_equi);
fprintf('Resistencia de dispersión R1 = %.2f ohms. \n',R1);
%
fprintf('Se dispone de 8 en paralelo. \n');
Req=R1/8;
fprintf('Resistencia de dispersión entre 8 Req = %.3f ohms. \n',Req);
%
fprintf('Caída de tensión típica. \n');
V_incial=I_inic*Req;
fprintf('Caída de tensión típica en fase inicial V_incial = %.2f V. \n',V_incial);
V_mant=I_mant*Req;
fprintf('Caída de tensión típica en fase mantenimiento V_mant = %.2f V. \n',V_mant);
%
fprintf('La profundidad de penetración (skin Depth) en agua de mar está dada por: \n');
sigma=5; % S/m.
uo=4*pi*10^-7; % H/m.
f=25*1000; % kHz.
prof=sqrt(2/(2*pi*f*uo*sigma));
fprintf('Profundidad de penetración prof = %.2f m. \n',prof);
%
f50k=50*1000; % kHz.
prof_f50k=sqrt(2/(2*pi*f50k*uo*sigma));
fprintf('Profundidad de penetración prof_f50k = %.2f m. \n',prof_f50k);
%
f100k=100*1000; % kHz.
prof_f100k=sqrt(2/(2*pi*f100k*uo*sigma));
fprintf('Profundidad de penetración prof_f100k = %.2f m. \n',prof_f100k);
%
V_impacto=I_imp*Req;
fprintf('Caída de tensión V_impacto = %.1f kV. \n',V_impacto);
%
fprintf('5.1.4.4.2. Barra equipotencial y bonding conductor. \n');
fprintf('Conductores. \n');
S=100; % kVA.
VII=220; % V.
In=S*1000/(sqrt(3)*VII);
fprintf('Corriente nominal In = %.2f A/fase. \n',In);
%
I_falla=(5)*In;
fprintf('Corriente de falla I_falla = %.f A/fase. \n',I_falla);
%

```

```

tiempo=0.2; % tiempo de despeje en s
k=115; % constante del cobre estañado con aislamiento
Secc=(I_falla*sqrt(tiempo))/(k);
fprintf('Sección del conductor de cobre estañado Secc = %.1f mm^2. \n',Secc);
%
fprintf('Herrajes. \n');
fprintf(' Pernos pasantes (para sujeción del ánodo principal): bronce M-14. \n');
fprintf(' Terminales de compresión estañados. \n');
fprintf(' Pasta antioxidante. \n');
fprintf(' Secciones alineadas con mínimos recomendados por ABYC E-11/ IEEE 45 para bonding en buques de estas dimensiones. \n');
%
fprintf('5.1.4.4.3. Voltajes de toque, paso y gradiente de potencial. \n');
r_eq=sqrt(WSA/pi);
fprintf('Radio equivalente r_eq = %.2f m. \n',r_eq);
fprintf('Corriente de falla conservadora (generador 100kVA, 220V): I_falla = %.2f kA. \n',I_falla/1000);
%
const_util=(rho_agua*I_falla)/(2*pi);
fprintf('Constante útil: const_util = %.1f V. \n',const_util);
%
fprintf('Voltaje de toque. \n');
V_agua=const_util/(r_eq+1);
fprintf('Voltaje de toque en agua: V_agua = %.2f V. \n',V_agua);
%
fprintf('Toque casco-agua a 1m: \n');
GPR=6.5;
V_T=GPR-V_agua;
fprintf('Voltaje de Toque casco-agua a 1m: V_T = %.1f V. \n',V_T);
fprintf('Cumple 30V \n');
%
fprintf('Voltaje de paso. \n');
Er_paso=const_util;
fprintf('Voltaje de toque a 1 metros: Er_paso = %.1f V. \n',Er_paso);
fprintf('No cumple con 50 V pero no cumple en escenario conservador 30 V. \n');
fprintf('De acuerdo con IEEE Std 80-2013 e IEC 60479-1, el límite general de tensión de contacto seguro en sistemas de baja tensión es 50 V. Sin \n');
fprintf('embargo, en condiciones de ambiente húmedo o marino, la impedancia corporal disminuye significativamente, motivo por el cual normas específicas \n');
fprintf('como ABYC E-11 y recomendaciones de IEEE Std 45 reducen el umbral a 30 V, valor adoptado en este proyecto como criterio de diseño conservador. \n');
%
fprintf('CULMINACIÓN DE CÁLCULOS. \n');
%
```

4.1.2. RESULTADOS DE LA EJECUCIÓN DEL CÓDIGO EN MATLAB.

```

Command Window

Código de cálculos para trabajo de titulación:
"DISEÑO DEL SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA EMBARCACIÓN DE TURISMO TIPO YATE CON CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE 75 KW CONSIDERANDO FRECUENCIAS DE TIPO INDUSTRIAL Y RAYO"
" UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL CARRERA DE ELECTRICIDAD. "
Autor: Eric Alberto Jurado Bravo.
Tutor: Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo, MSc.
Código con derechos de autor y propiedad de la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL.
Norma / Estándar: IEC 62305 (Partes 1-4).
Regula: Protección contra rayos: principios, evaluación de riesgo, diseño de captadores, bajantes y medidas internas.
Aplicado a: Cálculo de riesgo (Nr), nivel de protección (LPL), diseño de captadores y bajantes (Cap. 5.4 y 5.6).
Norma / Estándar: NTC 4552-1.
Regula: Sistemas de protección contra rayos (referencia regional latinoamericana).
Aplicado a: Validación de área de captura y riesgo, complementa IEC 62305 (Cap. 5.4).
Norma / Estándar: IEEE Std 45.
Regula: Prácticas recomendadas para instalaciones eléctricas en embarcaciones.
Aplicado a: Organización de tableros, bonding bus bar, selección de conductores de tierra (Cap. 5.5).
Norma / Estándar: IEEE Std 142 (Green Book).
Regula: Puesta a tierra en sistemas eléctricos de baja tensión.
Aplicado a: Dimensionamiento de conductores de tierra, esquemas de neutro IT/TT/TN, corrientes de falla (Cap. 5.4 y 5.5).
Norma / Estándar: ABYC E-11.
Regula: Sistemas eléctricos AC y DC en embarcaciones.
Aplicado a: Cableado, tableros, protecciones y seguridad del personal (Cap. 5.7).
Norma / Estándar: ABYC A-28.
Regula: Aisladores galvánicos.
Aplicado a: Protección contra corrientes galvánicas en conexión a muelle (Cap. 5.7).
Norma / Estándar: ABYC E-2.
Regula: Protección catódica en embarcaciones.
Aplicado a: Dimensionamiento, selección y ubicación de ánodos de sacrificio (Cap. 5.5).
Norma / Estándar: ASTM B843.
Regula: Especificaciones de materiales para ánodos de protección catódica (Mg, Zn, Al).
Aplicado a: Selección de materiales y calidad de ánodos en ambiente marino (Cap. 5.5).
Norma / Estándar: IEC 61643 / 61643-11.
Regula: Dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS).
Aplicado a: Selección y coordinación de DPS en tableros principales y secundarios (Cap. 5.7).
Norma / Estándar: IEC 61557-8.
Regula: Monitores de aislamiento (IMD) para sistemas IT.
Aplicado a: Selección e integración de IMD en sistema con neutro flotante (Cap. 5.7).
Norma / Estándar: IEC 60364-4-41.
Regula: Medidas de protección contra choques eléctricos.
Aplicado a: Validación de tensiones de toque y paso, selección de protecciones diferenciales (Cap. 5.4 y 5.5).
Norma / Estándar: IEC 60479-1.

```

```

Command Window

Norma / Estándar: IEC 60479-1.
Regula: Efectos fisiológicos de la corriente sobre el cuerpo humano.
Aplicado a: Fundamentación de los cálculos de seguridad: toque, paso y gradientes (Cap. 5.4).
5.1.4.1. Área de captura equivalente y número anual de descargas (IEC62305-2).
Área de captura equivalente (metros cuadrados):  $A_{eq} = 1926.41$ .
Número anual de descargas directas sobre embarcación:  $N_e = 0.02312$ .
Tiempo promedio entre descargas (año/impacto):  $T = 43.3$ .
5.1.4.2. Evaluación del riesgo de descargas atmosféricas (IEC62305-2).
 $P =$  probabilidad de daño dado un impacto (0-1).
 $L =$  fracción de pérdida cuando ocurre el daño (0-1).
Riesgos y tolerables IEC:
5.1.4.2.1. Escenario A (estado actual, sin LPS, DPS, IMD).
Escenario A:  $R_{IA} = 0.003468$  NO CUMPLE.
Escenario A:  $R_{4A\_sens} = 0.000891$  NO CUMPLE.
Pérdida anual esperada (EAL) = 2022.7298 USD/año.
Escenario 4A Total:  $R_{4ATot} = 0.003468$  NO CUMPLE.
Pérdida anual esperada (EAL4) = 866.8842 USD/año.
EN EL ESCENARIO ACTUAL,  $R_1$  Y  $R_4$  SUPERAN LOS LÍMITES TOLERABLES, ES OBLIGATORIO IMPLEMENTAR MEDIDAS.
5.1.4.2.2. Escenario B (Diseño propuesto).
Escenario B (Diseño propuesto):  $R_{IB\_Med} = 0.000104$  AÚN NO CUMPLE.
Escenario B (Diseño propuesto):  $R_{IB\_Fuerte} = 0.00004623$  AÚN NO CUMPLE.
Meta de cumplimiento (requerida por  $R_{T1}$ ).
El producto  $P \cdot L$  debe satisfacer:
Escenario B (Mejora definitiva):  $P\_Definitiva = 0.00043$ .
Escenario B (Diseño Definitivo):  $R_{IB\_Definitiva} = 0.00000925$  SÍ CUMPLE.
 $R_4$  pérdidas económicas.
Escenario B (Diseño Definitivo):  $R_{IB\_Def} = 0.0001156$  SÍ CUMPLE RT4.
EAL sensibles:  $EAL\_sensibles = 28.90$  USD/año.
EAL total:  $EAL\_total = 289$  USD/año.
5.1.4.3.1. Elección LPL.
Impactos /  $Km^2$  año:  $Ng\_LPL = 12$ .
Radio esfera:  $r = 20$  m.
Corriente de impacto:  $I_{imp} = 200$  kA.
5.1.4.3.2. Cobertura por método de la esfera rodante.
Radio aproximado para cobertura de esfera rodante:  $dh = 10.54$  m.
5.1.4.3.3. Distancia de separación (IEC62305-3).
En la práctica marina se adopta separación física  $\geq 10-50$ mm.
5.1.4.3.4. Electrodo de descarga al mar del LPS.
Comportamiento a 50/60Hz (frecuencia industrial).
Radio equivalente:  $a = 0.169$  m.

```

```

Command Window

Resistencia en frecuencia de 60 Hz:  $R_{60Hz} = 0.295 \text{ ohms}$ .
Inductancia aproximada de una cinta recta (H):  $L_{Inductancia} = 0.0000172 \text{ H}$ .
Reactancia inductiva:  $X_L = 10.81 \text{ ohms}$ .
5.1.4.3.5. Sección mínima de captador y bajante (LPL I).
• Captador: material de acero inoxidable o bronce naval con buena resistencia mecánica y a la corrosión, según IEC62385-3 y ABYC A-28 se utiliza punta franklin o varilla de  $\geq 16 \text{ mm}$  de diámetro si es cobre o  $\geq 10 \text{ mm}$  si es acero inoxidable, longitud  $\geq 0.3 \text{ m}$  por encima de la estructura a proteger.
• Bajante: material de cobre estañado, 2 bajantes en paralelo, una por babor y otra por estribor, sección mínima  $25 \times 3 \text{ mm}$  ( $75 \text{ [mm]}^2$ ), se recomienda  $30 \times 3 \text{ mm}$  ( $90 \text{ [mm]}^2$ ).
5.1.4.3.6. Diseño preliminar del LPS.
• Captador principal en la antena de mayor altura. Asegurar  $h$  efectivo  $\geq 3 \text{ m}$  sobre los puntos críticos para lograr  $d(h) \geq 10-12 \text{ m}$ .
• Doble bajante recta desde el captador hasta sala de máquinas, con cinta Cu estañada  $30 \times 3 \text{ mm}$ , ruta propia.
• Placa de descarga del LPS:  $300 \times 300 \times 3 \text{ mm}$  (o dos placas en paralelo si quieres margen), montada en casco siempre sumergido en sector de sala de máquinas; conexión directa y corta desde la bajante.
• Integración equipotencial: conexión a barra equipotencial principal; NO mezclar con ánodos de protección catódica del SPT.
• Medidas EMC: evitar lazos, mantener rutas rectas, cruces a  $90^\circ$ , y separar la bajante de cables de señal/potencia.
5.1.4.4. Diseño sistema puesta a tierra (SPT).
5.1.4.4.1. Dimensionamiento de ánodo de sacrificio.
  Datos base de la embarcación:
  Superficie mojada MSA.
  Superficie mojada MSA =  $322 \text{ m}^2$ .
  Factor de pintura.
  Fracción Inicial  $AF_{\text{inic}} = 16.1 \text{ m}^2$ .
  Fin de ciclo.
  Fracción Final  $AF_{\text{mant}} = 64.4 \text{ m}^2$ .
  Densidad de A por  $\text{m}^2$ .
  • Fase inicial: después de dique, casco recién pintado, poca área descubierta ( $0.05$ ), mucha demanda de A por  $\text{m}^2$  ( $0.10-0.20 \text{ A/m}^2$ ) por pequeñas áreas desnudas.
  • Fase de mantenimiento: después de los primeros 6 meses de operación, pintura en deterioro, mayor área descubierta, poca demanda de A por  $\text{m}^2$  ( $0.01-0.02 \text{ A/m}^2$ ) gracias a la pintura.
  Densidad de A  $I_{\text{inic}} = 2.414 \text{ A}$ .
  Densidad de A  $I_{\text{mant}} = 0.966 \text{ A}$ .
  Ponderación para un tiempo de 3 años (tiempo de operación en mar abierto).
  Ponderación para un tiempo de 3 años  $I_d = 3.259 \text{ año}$ .
  Ponderación para un tiempo de 3 años en horas  $Q = 28549 \text{ Ah}$ .
  Masa de ánodo necesaria (material y factores).
  Masa de ánodo necesaria  $m_{\text{zn}} = 45.3 \text{ Kg}$ .
  Margen de diseño ( $10-20$  por ciento)  $50-55 \text{ Kg}$  como objetivo práctico.
  Cantidad, distribución e impedancia de ánodos.
  Conductividad =  $5 \text{ Sm}$ .
  Placa  $300 \times 100 \times 40$ .
  Frecuencia industrial ( $50/60 \text{ Hz}$ ).
  Radio equivalente  $radio_{\text{equi}} = 0.098 \text{ m}$ .

```

```

Command Window

Radio equivalente  $radio_{\text{equi}} = 0.098 \text{ m}$ .
Resistencia de dispersión.
Resistencia de dispersión  $R_1 = 0.51 \text{ ohms}$ .
Se dispone de 8 en paralelo.
Resistencia de dispersión entre 8  $R_{eq} = 0.064 \text{ ohms}$ .
Caída de tensión típica.
Caída de tensión típica en fase inicial  $V_{\text{inicial}} = 0.15 \text{ V}$ .
Caída de tensión típica en fase mantenimiento  $V_{\text{mant}} = 0.06 \text{ V}$ .
La profundidad de penetración (skin Depth) en agua de mar está dada por:
Profundidad de penetración  $prof = 1.42 \text{ m}$ .
Profundidad de penetración  $prof_{f50k} = 1.01 \text{ m}$ .
Profundidad de penetración  $prof_{f100k} = 0.71 \text{ m}$ .
Caída de tensión  $V_{\text{impacto}} = 12.8 \text{ kV}$ .
5.1.4.4.2. Barra equipotencial y bonding conductor.
Conductores.
Corriente nominal  $I_n = 262.43 \text{ A/fase}$ .
Corriente de falla  $I_{\text{falla}} = 1312 \text{ A/fase}$ .
Sección del conductor de cobre estañado  $Secc = 5.1 \text{ mm}^2$ .
Herrajes.
  Pernos pasantes (para sujeción del ánodo principal): bronce M-14.
  Terminales de compresión estañados.
  Pasta antioxidante.
  Secciones alineadas con mínimos recomendados por ABYC E-11/ IEEE 45 para bonding en buques de estas dimensiones.
5.1.4.4.3. Voltajes de toque, paso y gradiente de potencial.
Radio equivalente  $r_{eq} = 10.12 \text{ m}$ .
Corriente de falla conservadora (generador  $100 \text{ kVA}$ ,  $220 \text{ V}$ ):  $I_{\text{falla}} = 1.31 \text{ kA}$ .
Constante útil:  $const_{\text{util}} = 41.8 \text{ V}$ .
Voltaje de toque.
Voltaje de toque en agua:  $V_{\text{agua}} = 3.76 \text{ V}$ .
Toque casco-agua a  $1 \text{ m}$ :  $V_T = 2.7 \text{ V}$ .
Cumple  $30 \text{ V}$ .
Voltaje de paso.
Voltaje de toque a  $1 \text{ metro}$ :  $Er_{\text{paso}} = 41.8 \text{ V}$ .
No cumple con  $50 \text{ V}$  pero no cumple en escenario conservador  $30 \text{ V}$ .
De acuerdo con IEEE Std 80-2013 e IEC 60479-1, el límite general de tensión de contacto seguro en sistemas de baja tensión es  $50 \text{ V}$ . Sin embargo, en condiciones de ambiente húmedo o marino, la impedancia corporal disminuye significativamente, motivo por el cual normas específicas como ABYC E-11 y recomendaciones de IEEE Std 45 reducen el umbral a  $30 \text{ V}$ , valor adoptado en este proyecto como criterio de diseño conservador.
CULMINACIÓN DE CÁLCULOS. ✨ Press (Ctrl) + (Shift) + (P) to generate code with Copilot
>>

```

5. CAPÍTULO V.

5.1. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.

La metodología adoptada se fundamenta en el cumplimiento de normas internacionales vigentes, como las series IEC 62305, IEEE Std 45, ABYC y normas ASTM aplicables, las cuales aseguran la confiabilidad y seguridad de las instalaciones eléctricas en entornos marinos. El desarrollo metodológico se estructura en etapas progresivas que incluyen:

- La recopilación y organización de datos técnicos de la embarcación, tales como características constructivas, capacidad de generación eléctrica, configuración de tableros de distribución y materiales empleados en el casco.
- La caracterización del entorno climatológico y marino, considerando parámetros ambientales propios del área de operación de la embarcación, tales como la densidad de descargas atmosféricas, humedad relativa, temperatura, salinidad del agua de mar, resistividad eléctrica del medio, y conductividad. Estos factores resultan determinantes para la estimación de gradientes de tensión, el comportamiento de los ánodos de sacrificio y la eficacia de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas.
- La propuesta de diseño y selección de componentes, donde se definen la ubicación y especificación de dispositivos tales como captadores, bajantes, ánodos de sacrificio, barras de bonding, dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) y monitores de aislamiento.

5.1.1. RECOPIACIÓN DE DATOS TÉCNICOS DE LA EMBARCACIÓN.

En este apartado se recopilan las características fundamentales del objeto de estudio, tales como el material del casco, dimensiones principales, capacidad de generación eléctrica, configuración de los grupos electrógenos, así como la distribución de tableros principales y secundarios. La embarcación analizada es un yate de turismo de casco metálico (acero naval), con eslora total de 39 metros, manga de 8,54 metros, calado moldeado de 2 metros y un desplazamiento de 255,01 toneladas. La capacidad de operación está definida para 32 personas (25 pasajeros y 7 tripulantes), distribuidas en cubiertas de alojamiento, áreas de servicios y espacios técnicos. La embarcación cuenta además con dos grupos electrógenos de 100 kVA cada uno, que operan de manera independiente (nunca en

paralelo) y suministran energía a una tensión nominal de 127/220 V, trifásica con neutro, a 60 Hz. Los generadores presentan una configuración de 12 puntas, conectados en esquema delta-estrella (Δ/Y) (7-1, 8-2, 9-3/10-11-12-4-5-6) con neutro accesible. Esta disposición permite obtener una salida trifásica de 127/220 V a 60 Hz, apta tanto para la alimentación de cargas trifásicas como monofásicas. La presencia del neutro accesible es determinante en el diseño de la protección eléctrica, ya que condiciona la estrategia de puesta a tierra y la aplicación del monitor de aislamiento (IMD) en el esquema de neutro flotante (IT) adoptado para la embarcación.

Tablero Principal de Distribución TPD (T1):

El tablero principal constituye el núcleo de distribución de energía de la embarcación y concentra la alimentación de equipos críticos y servicios generales. Entre las cargas conectadas destacan bombas de servicios hidráulicos y de seguridad, como la bomba de agua sanitaria (5 HP), agua dulce (3 HP), contra incendio (15 HP), agua caliente (2 HP), trasvase de combustible (1 HP), sistema de rociadores (sprinkler, 5 HP), bombas auxiliares de los generadores (1 HP cada una) y bomba de gambuza (1 HP). Asimismo, alimenta los sistemas de ventilación y extracción de la sala de máquinas, con ventiladores de 3 HP a cada banda y extractores de 3 HP.

Adicionalmente, desde este tablero se derivan alimentaciones hacia tableros secundarios especializados, con protecciones independientes mediante interruptores termomagnéticos: cabrestante y grúas (60 A), chillers (100 A), desalinizadora de agua (50 A), jacuzzi (50 A), poder de tierra (100 A), cocina (100 A), comedor (60 A), Tablero AC del puente (60 A), cabinas de cubierta inferior (60 A), cabinas de tripulación (60 A) y servomotor (20 A).

Tableros de Distribución TD1-12 (T2–T12):

T2: Tablero 12/24 VDC. Se alimenta de dos bancos de baterías: el primero, de 12 VDC–360 Ah (dos baterías de 12 V–180 Ah en paralelo), destinado al arranque de los generadores Caterpillar; y el segundo, de 24 VDC–180 Ah (dos baterías de 12 V–180 Ah en serie), utilizado para el arranque de los motores principales Scania.

T3: Tablero poder de tierra. Diseñado para la conexión de alimentación externa proveniente del muelle. En este tablero se proyecta la instalación de un aislador galvánico para proteger la línea de tierra, además de servir como punto de conexión del primario

del transformador de aislamiento que resguardará al yate durante estancias prolongadas en dique o muelle.

T4: Tablero cabinas cubierta inferior (60 A). Alimenta los servicios eléctricos de las cabinas de pasajeros ubicadas en cubierta inferior.

T5: Tablero cabinas de tripulación (60 A). Dedicado a la alimentación de servicios de cabinas de la tripulación.

T6: Tablero servomotor (20 A). Proporciona energía a los sistemas de control del servo.

T7: Tablero cabrestante y grúas (60 A). Encargado de la alimentación de maniobras auxiliares de carga y fondeo.

T8: Tablero comedor (60 A). Distribuye energía para iluminación y equipos eléctricos del comedor y salón principal.

T9: Tablero cocina (100 A). Dedicado a la alimentación de equipos de preparación de alimentos y refrigeración del bar-salon.

T10: Tablero AC puente (60 A). Provee energía a las cabinas de la cubierta superior y puente.

T11: Tablero 12 VDC. Se alimenta de un banco de baterías de 12 VDC–360 Ah (dos baterías de 12 V–180 Ah en paralelo), destinado a la operación de equipos de navegación y sistemas auxiliares.

T12: Tablero Chillers (100 A). Dedicado al control del sistema de climatización de todo el yate.

T13: Tablero jacuzzi (50 A). Suministra energía a los equipos de recreación asociados al jacuzzi de cubierta.

De acuerdo con el levantamiento preliminar de información, la embarcación no dispone de sistemas de protección instalados, lo que constituye un vacío crítico en materia de seguridad eléctrica, sin LPS, sin SPT, sin DPS. El valor económico estimado de los equipos eléctricos/electrónicos de navegación y comunicación a bordo supera los USD 200,000 mientras que el valor total de la infraestructura eléctrica y electrónica instalada en la embarcación se aproxima a los USD 2.500.000.

5.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO CLIMATOLÓGICO Y MARINO.

Desde el punto de vista climatológico, Galápagos presenta un régimen ecuatorial con marcada influencia de corrientes marinas frías y cálidas, lo que genera variaciones estacionales de temperatura y humedad. La temperatura ambiental oscila generalmente entre 20 °C y 30 °C, mientras que la humedad relativa supera en promedio el 75 %, alcanzando valores cercanos al 90 % en determinados meses del año. De acuerdo con los registros históricos de Puerto Ayora, la velocidad promedio del viento en los meses más ventosos supera los 7,9 nudos, alcanzando máximos de aproximadamente 10,2 nudos en septiembre, mientras que durante los meses menos ventosos los promedios se sitúan alrededor de 5,9 nudos [32]. En cuanto a la actividad eléctrica atmosférica, los registros internacionales (Lightning Imaging Sensor – LIS) ubican al Ecuador como un país con alta densidad de descargas atmosféricas. En la zona marítima de las Galápagos, la densidad de descargas (Ng) se encuentra en el rango de 6 a 12 impactos/km²/año, de acuerdo con [33], países como Ecuador, Senegal y Nepal registran entre 8 y 12 eventos de rayos por kilómetro cuadrado al año, estos valores corresponden a promedios nacionales obtenidos mediante sistemas de monitoreo especializados. Para la obtención de estos datos, [33] emplea dos redes de detección global de rayos: el Global Lightning Dataset (GLD360) y la National Lightning Detection Network (NLDN). El agua de mar circundante a las Galápagos presenta una conductividad eléctrica promedio de 4 a 5 S/m, asociada a una resistividad en el orden de 0,2 a 0,25 $\Omega \cdot m$, debido a la elevada concentración de sales disueltas (salinidad media entre 34 y 35 g/L). En la Tabla 3 se sintetizan los principales parámetros climatológicos y marinos que inciden en el diseño del sistema de protección. Estos valores constituyen la base para el cálculo del índice de riesgo por descargas atmosféricas y para el dimensionamiento del sistema de puesta a tierra y de los ánodos de sacrificio.

Parámetro	Valor típico	Observaciones
Temperatura ambiente	20-30 °C	Varía según estación
Humedad relativa	75-90 %	Nivel alto
Velocidad viento	6-10 nudos, max 18	1 nudo = 1.852 Km/h
Densidad de descargas	8-12 impactos/km ² año	Nivel alto

Salinidad	34-35 g/L	Media en zona ecuatorial
Conductividad	4-5 S/m	Elevada
Resistividad	0.20-0.25 $\Omega \cdot m$	Alta agresividad corrosiva

Tabla 3. Parámetros climatológicos y oceanográficos de referencia en las Galápagos.

Fuente: El autor.

5.1.3. ANÁLISIS NORMATIVO Y CONCEPTUAL.

En primer lugar, la serie IEC 62305 (Partes 1 a 4) [14], [15], [16], [30] constituye la referencia principal para la protección contra rayos. Estas normas establecen los principios generales, la metodología de evaluación del riesgo, el cálculo del índice de riesgo (Nr), así como los criterios de diseño del sistema de captación, bajantes y medidas de protección internas. En el presente estudio se emplean para determinar el nivel de protección requerido (LPL) y para definir la geometría del sistema de captadores y conductores de bajada. La NTC 4552-1 [18] complementa lo anterior como norma de referencia regional, aplicable en Latinoamérica. Respecto a las instalaciones eléctricas a bordo, la IEEE Std 45 – Recommended Practice for Electrical Installations on Shipboard [21] constituye la guía central. Esta norma se aplica en la organización de los tableros de distribución, la implementación de barras de equipotencialidad, la selección de conductores de puesta a tierra y en la integración de equipos eléctricos en el ambiente marino. Complementariamente, la IEEE Std 142 (Green Book) [20] proporciona los fundamentos para la puesta a tierra de sistemas eléctricos en baja tensión, orientando el cálculo de corrientes de falla y la evaluación de diferentes esquemas de neutro (IT, TT y TN). En el ámbito de la normativa náutica, la ABYC E-11 – AC & DC Electrical Systems on Boats [22] establece lineamientos específicos para sistemas eléctricos en embarcaciones, en particular sobre cableado, protecciones, organización de tableros y seguridad del personal a bordo. A esta se suman la ABYC A-28 [23], que regula el uso de aisladores galvánicos para evitar corrientes de fuga a través de la conexión a tierra de muelle, y la ABYC E-2 [24], que define los requisitos para la protección catódica mediante ánodos de sacrificio en embarcaciones metálicas. Para la selección y coordinación de dispositivos de protección contra sobretensiones, se emplea la IEC 61643 e IEC 61643-11 [27], que definen los requisitos técnicos y ensayos para los DPS de baja tensión. Estos se aplican en el diseño de la protección frente a sobretensiones transitorias

en tableros principales y secundarios. Asimismo, la IEC 61557-8 [34] regula los dispositivos de supervisión de aislamiento (IMD), los cuales se incorporan en el presente diseño para monitorear la resistencia de aislamiento de un sistema con neutro flotante (IT). En relación con la seguridad de las personas, la IEC 60364-4-41 [35] establece las medidas de protección contra choques eléctricos en instalaciones de baja tensión, mientras que la IEC 60479-1 [17] describe los efectos fisiológicos de la corriente sobre el cuerpo humano. Estas dos referencias se aplican en la evaluación de las tensiones de toque, paso y gradiente de potencial dentro del casco metálico de la embarcación, garantizando que los valores obtenidos se mantengan dentro de límites aceptables para la seguridad de la tripulación y pasajeros. Finalmente, la selección de materiales para los ánodos de sacrificio se fundamenta en la ASTM B843 [19], que especifica los requisitos de calidad para ánodos de magnesio empleados en protección catódica.

Norma / Estándar	¿Qué regula?	Aplicación en la metodología
IEC 62305 (Partes 1–4)	Protección contra rayos: principios, evaluación de riesgo, diseño de captadores, bajantes y medidas internas	Cálculo de riesgo (Nr), nivel de protección (LPL), diseño de captadores y bajantes (Cap. 5.4 y 5.6)
NTC 4552-1	Sistemas de protección contra rayos (referencia regional latinoamericana)	Validación de área de captura y riesgo, complementa IEC 62305 (Cap. 5.4)
IEEE Std 45	Prácticas recomendadas para instalaciones eléctricas en embarcaciones	Organización de tableros, bonding bus bar, selección de conductores de tierra (Cap. 5.5)
IEEE Std 142 (Green Book)	Puesta a tierra en sistemas eléctricos de baja tensión	Dimensionamiento de conductores de tierra, esquemas de neutro IT/TT/TN, corrientes de falla (Cap. 5.4 y 5.5)
ABYC E-11	Sistemas eléctricos AC y DC en embarcaciones	Cableado, tableros, protecciones y seguridad del personal (Cap. 5.7)
ABYC A-28	Aisladores galvánicos	Protección contra corrientes galvánicas en conexión a muelle (Cap. 5.7)
ABYC E-2	Protección catódica en embarcaciones	Dimensionamiento, selección y ubicación de ánodos de sacrificio (Cap. 5.5)
ASTM B843	Especificaciones de materiales para ánodos de protección catódica (Mg, Zn, Al)	Selección de materiales y calidad de ánodos en ambiente marino (Cap. 5.5)
IEC 61643 / 61643-11	Dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS)	Selección y coordinación de DPS en tableros principales y secundarios (Cap. 5.7)

IEC 61557-8	Monitores de aislamiento (IMD) para sistemas IT	Selección e integración de IMD en sistema con neutro flotante (Cap. 5.7)
IEC 60364-4-41	Medidas de protección contra choques eléctricos	Validación de tensiones de toque y paso, selección de protecciones diferenciales (Cap. 5.4 y 5.5)
IEC 60479-1	Efectos fisiológicos de la corriente sobre el cuerpo humano	Fundamentación de los cálculos de seguridad: toque, paso y gradientes (Cap. 5.4)

Tabla 4. Normas y estándares aplicados en el desarrollo metodológico.

Fuente: El autor.

5.1.4. MODELOS DE CÁLCULOS APLICADOS.

En este subcapítulo se desarrollan los cálculos necesarios para dimensionar y justificar el LPS y el SPT de la embarcación. El proceso inicia con la determinación del área de captura equivalente y del número anual de descargas esperadas sobre la nave, lo que constituye la base para la evaluación del riesgo y la comparación con los niveles tolerables establecidos en la normativa IEC 62305-2.

5.1.4.1. APANTALLAMIENTO LPS.

5.1.4.1.1. ÁREA DE CAPTURA EQUIVALENTE Y NÚMERO ANUAL DE DESCARGAS (IEC62305-2).

Datos:

Longitud (L)= 39m

Manga (W)= 8.54m

Altura (H)= 12m

Densidad de descargas (Ng)= 12impactos/Km²año

Área de captura equivalente:

Ecuación 2. Cálculo del área de captura equivalente.

$$A_{eq} = L * W + 2 * L * H + 2 * W * H + \pi * H^2 \quad (2)$$

$$A_{eq} = 39 * 8.54 + 2 * 39 * 12 + 2 * 8.54 * 12 + 3.1416 * 12^2$$

$$A_{eq} \approx 1926.41 \text{ m}^2.$$

Número anual de descargas directas sobre embarcación:

Ecuación 3. Cálculo del número anual de descargas directas.

$$N_e = N_g * \frac{A_{eq}}{10^6} \quad (3)$$

$$N_e = 12 * \frac{1926.41}{10^6}$$

$$N_e \approx 0.02312 a^{-1}$$

Tiempo promedio entre descargas (año/impacto):

Ecuación 4. Tiempo promedio entre descargas.

$$T = \frac{1}{N_e} \quad (4)$$

$$T = \frac{1}{0.02312} \approx 43.3 \text{ (aproximadamente 1 impacto cada 43.3 años).}$$

El valor de N_e representa la frecuencia base de impactos directo (S1) que alimenta el cálculo de riesgo del siguiente apartado, y, en última instancia, la selección del nivel de protección (LPL) del sistema de protección de rayos.

5.1.4.1.2. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (IEC62305-2).

Ecuación 5. Evaluación del riesgo de descargas atmosféricas.

$$R = N_e * P * L \quad (5)$$

- P = probabilidad de daño dado un impacto (0-1).
- L = fracción de pérdida cuando ocurre el daño (0-1).

Riesgos y tolerables IEC:

- $R_1: R_{T1} = 1 * 10^{-5} a^{-1}$ (vidas humanas).
- $R_4: R_{T4} = 1 * 10^{-3} a^{-1}$ (pérdidas económicas).

ESCENARIO A (ESTADO ACTUAL, SIN LPS, DPS, IMD).

- R_1 (vidas): $P = 1$; $L = 0.15$

Ecuación 6. Escenario A con R_1 (vidas).

$$R_{1A} = N_e * P * L \quad (6)$$

$$R_{1A} = 0.02312 * 1 * 0.15$$

$$R_{1A} = 3.468 * 10^{-3} \text{ (NO CUMPLE)}$$

- R_4 (económico):

Base sensible $V_{sens} = 250.000 \text{ USD}; P = 1 ; L = 0.35$

Ecuación 7. Escenario A con R_4 (vidas).

$$R_{4Asens} = N_e * P * L \quad (7)$$

$$R_{4Asens} = 0.02312 * 1 * 0.35$$

$$R_{4Asens} = 8.091 * 10^{-3} \text{ (NO CUMPLE)}$$

Pérdida anual esperada (EAL) = $0.008091 * 250.000 \approx 2,023 \text{ USD/año}$

Base total $V_{tot} = 2.500.000 \text{ USD}; P = 1 ; L = 0.15$

Ecuación 8. Escenario A con Base total.

$$R_{4Atot} = N_e * P * L \quad (8)$$

$$R_{4Atot} = 0.02312 * 1 * 0.35$$

$$R_{4Atot} = 3.468 * 10^{-3} \text{ (NO CUMPLE)}$$

Pérdida anual esperada (EAL) = $0.003468 * 2.500.000 \approx 8,669 \text{ USD/año}$

EN EL ESCENARIO ACTUAL, R_1 Y R_4 SUPERAN LOS LÍMITES TOLERABLES, ES OBLIGATORIO IMPLEMENTAR MEDIDAS.

La pérdida anual esperada (EAL) corresponde a un valor estadístico medio expresado en dólares por año. Este indicador se proyecta sobre la vida útil de la embarcación ($\approx 25\text{--}30$ años), por lo que las pérdidas acumuladas sin protección alcanzarían del orden de 60.000 USD en equipos sensibles y más de 250.000 USD en toda la instalación eléctrica.

ESCENARIO B (DISEÑO PROPUESTO).

- R_1 vidas

Mejora moderada: $P = 0.15$; $L = 0.03$

Ecuación 9. Escenario B con R_1 (vidas).

$$R_{1Bmod} = N_e * P * L \quad (9)$$

$$R_{1Bmod} = 0.02312 * 0.15 * 0.03$$

$$R_{1Bmod} = 1,040 * 10^{-4} \text{ (AÚN NO CUMPLE)}$$

Mejora fuerte: $P = 0.10$; $L = 0.02$

Ecuación 10. Escenario B con R_1 Mejorado.

$$R_{1Bfue} = N_e * P * L \quad (10)$$

$$R_{1Bfue} = 0.02312 * 0.10 * 0.02$$

$$R_{1Bfue} = 4,623 * 10^{-5} \text{ (AÚN NO CUMPLE)}$$

Meta de cumplimiento (requerida por R_{T1}).

El producto $P * L$ debe satisfacer:

$$P * L \leq \frac{R_{T1}}{N_e} = \frac{1 * 10^{-5}}{0.02312} \approx 4.33 * 10^{-4}$$

Mejora definitiva: $P = 0.04$; $L = 0.01$

Ecuación 11. Escenario B con R_1 Definitivo.

$$R_{1Bdef} = N_e * P * L \quad (11)$$

$$R_{1Bdef} = 0.02312 * 0.04 * 0.01$$

$$R_{1Bdef} = 9.25 * 10^{-6} \text{ (SI CUMPLE)}$$

- R_4 pérdidas económicas

$P = 0.10$; $L = 0.05$ (LPS+DPS+EMC bien coordinados).

Ecuación 12. Escenario B con R_4 Definitivo.

$$R_{4B} = N_e * P * L \quad (12)$$

$$R_{1Bdef} = 0.02312 * 0.10 * 0.05$$

$$R_{1Bdef} = 1,156 * 10^{-4} \text{ (SI CUMPLE } R_{T4})$$

EAL sensibles: $1,156 * 10^{-4} * 250.000 \approx 28.90\$/año$

EAL total: $1,156 * 10^{-4} * 2.500.000 \approx 289\$/año$

Para llegar a R_{T1} necesitamos LPS muy bien ejecutado (rutas rectas, uniones de baja impedancia, verificación de distancia de separación), equipotencialidad impecable, IMD operativo y DPS internos coordinados. Además, considerar factor de ocupación real (tiempo con pasajeros a bordo) ayuda a bajar L .

Como se mencionó con anterioridad, en el modelo de la IEC 62305-2, el riesgo $R = N_e * P * L$ depende de dos factores internos:

- P (probabilidad de daño): refleja la capacidad del sistema de protección contra rayos (LPS, DPS, EMC, etc.) para interceptar y conducir la descarga sin que cause efectos peligrosos.

Si P es alto ($\approx 1,0$): no hay protecciones $\rightarrow$ cualquier impacto produce daño.

Si P es bajo ($0,05-0,2$): el LPS y los DPS reducen mucho esa probabilidad.

- L (fracción de pérdida): representa la magnitud de la pérdida si ocurre el daño.

Si L es alto ($0,1-0,3$): no hay equipotencialidad ni redundancia $\rightarrow$ daños graves.

Si L es bajo ($0,01-0,05$): hay equipotencialidad, IMD, DPS internos, transformador de aislamiento $\rightarrow$ los efectos se limitan y las pérdidas son menores.

Caso	P	L	Resultado	Interpretación
R1 – Actual	1,00	0,15	$R1A = 3,47 \times 10^{-3}$	No cumple
R1 – Meta	0,04	0,01	$R1B = 9,25 \times 10^{-6}$	Cumple
R4 – Actual (sensibles)	1,00	0,35	$R4A = 8,09 \times 10^{-3}$	EAL $\approx$ 2.023 USD/año (No cumple)
R4 – Actual (total)	1,00	0,15	$R4A = 3,47 \times 10^{-3}$	EAL $\approx$ 8.669 USD/año (No cumple)
R4 – Propuesto (típico)	0,10	0,05	$R4B = 1,16 \times 10^{-4}$	EAL $\approx$ 28,9 USD/año (sensibles) y 289 USD/año (total) – Cumple

Tabla 5. Resumen comparativo de escenarios de riesgo.**Fuente:** El autor.

5.1.4.1.3. SELECCIÓN DEL NIVEL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS (LPL) Y DISEÑO PRELIMINAR DEL LPS.

La norma IEC62305 define cuatro niveles de protección (I a IV) asociados con la corriente máxima del rayo y al radio de la esfera rodante que determina la zona protegida.

Nivel de protección	Probabilidad de captura de corrientes máximas	Corriente pico (kA)	Radio esfera rodante (m)
LPL I	Protege hasta 99% de descargas	200 kA	20 m
LPL II	Protege hasta 95% de descargas	150 kA	30 m
LPL III	Protege hasta 90% de descargas	100 kA	45 m
LPL IV	Protege hasta 80% de descargas	100 kA	60 m

Tabla 6. Niveles de protección según IEC.**Fuente:** El autor.

A menor radio de la esfera, más estricto es el diseño captando incluso rayos de menor energía y en posiciones más alejadas.

ELECCIÓN LPL.

Con $Ng = 12Km^{-2}$ y la meta $P * L \leq 4.33 * 10^{-4}$ adoptamos LPL I

- Parámetros LPL I: radio de esfera $r = 20m$, corriente de diseño $I_{imp=200Ka}$ (onda 10/350).

COBERTURA POR MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE.

Para un captador tipo varilla, según normativa el radio horizontal protegido se da por:

Ecuación 13. Cobertura por método de la esfera rodante.

$$d(h) = \sqrt{(2 * r * h) - h^2} \quad (h \text{ es la altura efectiva del captador sobre la superficie a proteger}). \quad (13)$$

$$d(h) = \sqrt{(2 * 20 * 3) - 3^2}$$

$$d(h) = 10.54m$$

Si la punta captadora queda 3 metros por encima del punto más alto a proteger, el círculo protegido tiene radio aproximado a 10.5 m, lo suficiente para una superestructura de 8-10m de ancho.

DISTANCIA DE SEPARACIÓN (IEC62305-3).

En la práctica marina se adopta separación física $\geq 10\text{-}50\text{mm}$ y ruta propia de la bajante para holgura EMC. Se recomienda 2 bajantes si el casco lo permite, una a babor y otra a estribor, ambas hacia la misma placa ya que reduce la inductancia a la mitad lo cual concluye en menos sobretensión en casos de impulso (rayos).

ELECTRODO DE DESCARGA AL MAR DEL LPS.

- Comportamiento a 50/60HZ (frecuencia industrial).

PLACA PROPUESTA SEGÚN NORMATIVA: 300*300*3MM ($A = 0.09m^2$)

Material: bronce naval o Cu-Ni, instalada en sala de máquinas en área sumergida.

Resistividad agua de mar: $\rho \approx 0.20 \Omega m$

Radio equivalente: $a = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \approx 0.169 m$

Ecuación 14. Resistencia a 60 Hz.

$$R_{60Hz} \approx \frac{\rho}{4 * a} \quad (14)$$

$$R_{60Hz} \approx \frac{0.20}{4 * 0.169}$$

$$R_{60Hz} \approx 0.296\Omega$$

- Comportamiento a altas frecuencias (impulso/rayo).

En una descarga, la impedancia total está dominada por la inductancia de la bajante y su geometría.

Bajante propuesta: cinta de Cu estañada 30*3mm, longitud $l \approx 12m$

Inductancia aproximada de una cinta recta (H):**Ecuación 15.** Inductancia aproximada de una cinta recta.

$$L \approx 2 * 10^{-7} l \left[\ln \frac{2l}{w} + 0.5 \right]; l = 12m; w = 3 \quad (15)$$

$$L = 17.2 \mu H$$

Reactancia inductiva:**Ecuación 16.** Reactancia inductiva.

$$X_L = 2 * \pi * f * L \quad (16)$$

$$f = 100KHz$$

$$X_L = 2 * \pi * 100 * 17.2$$

$$X_L \approx 10.83\Omega$$

SECCIÓN MÍNIMA DE CAPTADOR Y BAJANTE (LPL I).

Captador: material de acero inoxidable o bronce naval con buena resistencia mecánica y a la corrosión, según IEC62305-3 y ABYC A-28, se utiliza punta franklin o varilla de $\geq 16mm$ de diámetro si es cobre o $\geq 10mm$ si es acero inoxidable, longitud $\geq 0.3m$ por encima de la estructura a proteger.

Bajante: material de cobre estañado, 2 bajantes en paralelo, una por babor y otra por estribor, sección mínima $25*3mm$ ($75mm^2$), se recomienda $30*3mm$ ($90mm^2$).

DISEÑO PRELIMINAR DEL LPS.

- Captador principal en la antena de mayor altura. Asegurar h efectivo $\geq 3m$ sobre los puntos críticos para lograr $d(h) \geq 10 - 12m$.
- Doble bajante recta desde el captador hasta sala de máquinas, con cinta Cu estañada 30×3 mm, ruta propia.
- Placa de descarga del LPS: $300 \times 300 \times 3$ mm (o dos placas en paralelo si quieres margen), montada en casco siempre sumergido en sector de sala de máquinas; conexión directa y corta desde la bajante.

5.1.4.2. SISTEMA PUESTA A TIERRA SPT.

El SPT constituye uno de los elementos esenciales de la seguridad eléctrica a bordo de las embarcaciones. El diseño metodológico del SPT busca no solo establecer las dimensiones y materiales de cada componente, sino también asegurar que los valores de impedancia de tierra y las tensiones de toque y paso se mantengan dentro de límites seguros.

5.1.4.2.1. DIMENSIONAMIENTO DE ÁNODO DE SACRIFICIO.

Datos base de la embarcación:

$$LWL = 34.79m ; BWL = 8.28m ; T = 2m ; Aw = 223m^2$$

Superficie mojada WSA.

Rango típico: para yates/embarcaciones de desplazamiento:

C_{wsa} = Factor forma del casco, según normativa, para embarcaciones/yates de desplazamiento esta en un rango de 0.85-0.95, 0.85 se adopta para cascos de embarcaciones finas tipo velero y 0.95 se adopta para cascos de embarcaciones grandes cuadradas como un carguero.

Ecuación 17. Superficie mojada WSA.

$$WSA \approx C_{wsa} * LWL * (BWL + T) \quad (17)$$

$$WSA \approx 0.90 * 34.79 * (8.28 * 2)$$

$$WSA \approx 322m^2$$

Factor de pintura.

El casco es pintado, solo una fracción queda expuesta al inicio, esa fracción crece con el tiempo.

- Condición inicial $F_{inic} = 0.05$ (5%)

Ecuación 18. Condición inicial del factor de pintura.

$$AF_{inic} = WSA * F_{inic} \quad (18)$$

$$AF_{inic} = 322 * 0.05$$

$$AF_{inic} = 16.1m^2$$

- Fin de ciclo $F_{mant} = 0.20$ (20%)

Ecuación 19. Fin de ciclo del factor de pintura.

$$AF_{mant} = WSA * F_{inic} \quad (19)$$

$$AF_{mant} = 322 * 0.20$$

$$AF_{mant} = 64.4m^2$$

Densidad de A por m^2 .

En los sistemas de protección catódica por ánodos galvánicos (sacrificiales), la corriente protectora no proviene de una fuente externa (como en los sistemas de corriente impresa, ICCP), sino de la diferencia de potencial electroquímico entre el material del ánodo y el acero del casco. Estos electrones fluyen hacia la superficie del acero, convirtiéndolo en cátodo. De este modo, la densidad de corriente (A/m^2) se define como la intensidad de corriente que efectivamente entrega el ánodo por unidad de área de acero protegido.

Según NACE, DVN, ABS.

- Fase inicial: después de dique, casco recién pintado, poca área descubierta ($\sim 5\%$), mucha demanda de A por m^2 ($0.10 - 0.20A/m^2$) por pequeñas áreas desnudas.
- Fase de mantenimiento: después de los primeros 6 meses de operación, pintura en deterioro, mayor área descubierta, poca demanda de A por m^2 ($0.01 - 0.02A/m^2$) gracias al biofilm y anticorrosivo de la pintura.

Cuando se calcula la carga total para 3 años, no se puede tomar un solo valor de densidad corriente, si usamos solo la de la fase inicial, sobreestimamos, caso contrario, si usamos solo la de la fase de mantenimiento, por lo cual se llega a la ponderación (0.25 años inicial + 2.75 años mantenimiento). Para el desarrollo de esta tesis se adoptan los valores intermedios de $0.15 A/m^2$ para fase inicial y $0.015 A/m^2$ para fase mantenimiento.

- $J_{inic} = 0.15A/m^2$

Ecuación 20. Corriente inicial del escenario propuesto.

$$I_{inic} = J_{inic} * AF_{inic} \quad (20)$$

$$I_{inic} = 0.15 * 16.1$$

$$I_{inic} = 2,415 A$$

- $J_{mant} = 0.015 A/m^2$

Ecuación 21. Corriente de mantenimiento del escenario propuesto.

$$I_{mant} = J_{mant} * AF_{mant} \quad (21)$$

$$I_{mant} = 0.015 * 64.4$$

$$I_{mant} = 0.966 A$$

Ponderación para un tiempo de 3 años (tiempo de operación en mar abierto).

Ecuación 22. Ponderación para un tiempo de 3 años.

$$I_d = I_{inic} * 0.25 + I_{mant} * 2.75 \quad (22)$$

$$I_d = 2.415 * 0.25 + 0.966 * 2.75$$

$$I_d = 3,260 A * año$$

En Ah:

$$Q = I_d * 8760$$

$$Q = 2360 * 8760 \approx 28.560 Ah$$

Masa de ánodo necesaria (material y factores).

Material: Zinc marino ASTM B418 Tipo 1 (mar abierto).

Parámetros típicos:

- Capacidad $C \approx 780 Ah/Kg$
- Eficiencia $\eta \approx 0.95$ (tipo 1)
- Utilización $u \approx 0.85$

Masa.

Ecuación 23. Masa de ánodo necesaria.

$$m_{zn} = \frac{Q}{C * \eta * u} \quad (23)$$

$$m_{zn} = \frac{28.560}{780 * 0.95 * 0.85}$$

$$m_{zn} = 45.3Kg$$

Margen de diseño (10-20%) 50-55Kg como objetivo práctico.

Cantidad, distribución e impedancia de ánodos.

Lo que se busca es suficiente masa y buena homogeneidad de potencial lo cual se traduce que entre más puntos hay mejor reparto. Desde la ficha ASTM B418 para un reparto fino se hace la elección de:

- 1 ánodo tipo perno CBT-2 (placa 300 x 150 x 40) para enlace con bonding bus bar.
- 8 ánodos tipo soldadura CB-8 (placa 300 x 100 x 40) para distribución con mejor uniformidad.

Agua de mar: $\rho = 0.20\Omega m$

Conductividad: $\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0.20} = 5Sm$

Placa 300*100*40

Frecuencia industrial (50/60 Hz).

$A = 0.03m^2$

Radio equivalente: $a = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.03}{\pi}} = 0.098$

Resistencia de dispersión:

Ecuación 24. Resistencia de dispersión.

$$R_1 = \frac{\rho}{4 * a} \quad (24)$$

$$R_1 = \frac{0.20}{4 * 0.098}$$

$$R_1 = 0.51\Omega$$

Se dispone de 8 en paralelo

$$R_{eq} = \frac{0.51}{8} \approx 0.064\Omega$$

Caída de tensión típica.

Fase inicial: $I_{inic} \approx 2.415 A$

Ecuación 25. Caída de tensión típica para Fase inicial.

$$V = I_{inic} * R_{eq} \quad (25)$$

$$V \approx 2.415 * 0.064$$

$$V \approx 0.15V$$

Fase de mantenimiento: $I_{mant} \approx 0.966 A$

Ecuación 26. Caída de tensión típica para Fase de mantenimiento.

$$V = I_{mant} * R_{eq} \quad (26)$$

$$V \approx 0.966 * 0.064$$

$$V \approx 0.06V$$

A frecuencia industrial la impedancia es muy baja, las caídas de tensión en los ánodos son despreciables frente a los potenciales de protección.

Alta frecuencia (pulso/rayo).

La profundidad de penetración (skin Depth) en agua de mar está dada por:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega * \mu_0 * \sigma}}$$

$$\sigma = 5S/m$$

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} H/m$$

- $f = 25 \text{ kHz}$

Ecuación 27. La profundidad de penetración (skin Depth) para frecuencia de 25 kHz.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(2 * \pi * f) * 4\pi * 10^{-7} * 5}} \quad (27)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(2 * \pi * 25) * 4\pi * 10^{-7} * 5}}$$

$$\delta = 1.42 \text{ m}$$

- $f = 50 \text{ kHz}$

Ecuación 28. La profundidad de penetración (skin Depth) para frecuencia de 50 kHz.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(2 * \pi * f) * 4\pi * 10^{-7} * 5}} \quad (28)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(2 * \pi * 50) * 4\pi * 10^{-7} * 5}}$$

$$\delta = 1.01 \text{ m}$$

- $f = 100 \text{ kHz}$

Ecuación 29. La profundidad de penetración (skin Depth) para frecuencia de 100 kHz.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(2 * \pi * f) * 4\pi * 10^{-7} * 5}} \quad (29)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(2 * \pi * 100) * 4\pi * 10^{-7} * 5}}$$

$$\delta = 0.71 \text{ m}$$

Aunque los ánodos tienen impedancias bajas, no se usan para evacuar rayos, el LPS tiene placa dedicada y bajantes de baja inductancia; de todas formas, si un impulso intentara circular por el SPT, la caída sería:

Ecuación 30. Caída de tensión para R_{eq} .

$$V = I_{rayo} * R_{eq} \quad (30)$$

$$V = 200000 * 0.064$$

$$V = 12.8 \text{ kV}$$

5.1.4.2.2. BARRA EQUIPOTENCIAL Y BONDING CONDUCTOR.

El propósito de este apartado es crear una red equipotencial que una todas las masas metálicas existentes en la embarcación como carcasas de equipos, tableros, tomas de mar, válvulas, tanques, motores, ejes, etc., con una barra madre denominada *bonding bus bar*, la cual se enlazara directamente con el ánodo de sacrificio lo cual proporciona seguridad ante fallas a tierra manteniendo tensiones de contacto bajas y una referencia eléctrica común para equipos de protección como los IMD y DPS. En la figura 19 se detalla la conexión de cómo se conecta el *bonding bus bar* con el ánodo de sacrificio de una manera aislada al casco por medio de pernos pasante entre bocines de caucho.



Figura 19. Conexión entre *bonding bus bar* y ánodo de sacrificio.

Fuente: El Autor.

Arquitectura propuesta.

- Bonding bus bar: barras madres, ubicación en sobre el chasis de los motores.
- Barras colectoras: barras secundarias, ubicación distribuida en toda la embarcación, 15 barras para corriente AC y 2 barras para corriente DC.

BMAC	Barra madre AC	1
BMDC	Barra madre DC	1
BCTA	Barra colectoras tomas de agua	1
BCVB	Barra colectoras válvulas de bombas	1
BCVC	Barra colectoras válvula de chillers	1
BCET	Barra colectoras equipos taller	1
BCT1-12	Barras colectoras tableros 1 al 12	12

Tabla 7. Cantidad y nombres de barras en general.

Fuente: El autor.

Materiales y herrajes.

Barras

IEC 61439 / IEC 60364 / IEEE 45 / ABYC E-11: sugieren que las barras de tierra tengan una sección no inferior al 50% de la sección del conductor de fase mayor o un mínimo absoluto de 50 mm² de cobre.

Práctica marina (ABYC / Lloyd's): se usan barras de cobre estañado rígido, con sección plana $\geq 25 \times 3$ mm (75 mm²) en pequeñas embarcaciones, y 30×5 mm (150 mm²) o más en yates >30 m de eslora como el de este proyecto.

Barras madres: cobre estañado 50*5mm.

Barras colectoras: cobre estañado 30*5mm.

Conductores.

El conductor de bonding debe soportar térmicamente la corriente de falla a masa hasta que el dispositivo de protección despeje la falla. Se aplica la fórmula adiabática (IEC 60364-5-54 / IEEE 45 / ABYC E-11):

Ecuación 31. Cálculo de la sección del conductor.

$$S = \frac{I_{falla} * \sqrt{t}}{k} \quad (31)$$

S : sección del conductor en mm^2

I_{falla} : corriente de falla en A

t : tiempo de despeje en s

k : constante del cobre estañado con aislamiento

Sistema 127/220V 3F + N

Generador típico 100kVA

Ecuación 32. Cálculo de la corriente nominal.

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} * V_{ll}} \quad (32)$$

$$I_n = \frac{100000}{\sqrt{3} * 220}$$

$$I_n = 262.43 \text{ A/fase}$$

Ecuación 33. Cálculo de la corriente de falla.

$$I_{falla} = (3 - 5) * I_n \quad (33)$$

$$I_{falla} = 5 * 262.43$$

$$I_{falla} = 1310 \text{ A}$$

Ecuación 34. Cálculo de la sección posterior a una corriente de falla.

$$S = \frac{I_{falla} * \sqrt{t}}{k} \quad (34)$$

$$S = \frac{13010 * \sqrt{0.2}}{115}$$

$$S = \frac{13010 * 0.447}{115}$$

$$S \approx 5.1 \text{ mm}^2$$

Conductores barras colectoras a barras madres: cobre estañado 16mm^2 .

Conductor barras madre a ánodo: cobre estañado 35mm^2 .

Herrajes.

Pernos pasantes (para sujeción del ánodo principal): bronce M-14.

Terminales de compresión estañados.

Pasta antioxidante.

Secciones alineadas con mínimos recomendados por ABYC E-11/ IEEE 45 para bonding en buques de estas dimensiones.

El sistema de bonding propuesto presenta capacidad térmica homologada para corrientes de falla en el orden de los kA durante 0.2 segundos o más, garantizando continuidad equipotencial y seguridad ante contactos indirectos.

5.1.4.2.3. TENSIONES DE TOQUE, PASO Y GRADIENTE DE POTENCIAL.

Límites de seguridad.

Referencia general (IEEE/IEC): 50VAC

Criterio adoptado en este proyecto: 30VAC por ambiente húmedo marino (mayor conductividad y posible contacto directo con el agua)

Resistividad agua de mar: $\rho = 0.20\Omega * m$

Superficie mojada: $WSA = 322\text{m}^2$

Radio equivalente: $a = \sqrt{\frac{WSA}{\pi}} \approx 10.12\text{m}$

Corriente de falla conservadora (generador 100kVA, 220V): $I_f \approx 5I_n \approx 1.31 \text{ kA}$

Constante útil: $\frac{\rho * I_f}{2\pi} \approx 41.7\text{V}$

Tensión de toque.

Abordo, las carcasas metálicas y el casco están al mismo potencial (red equipotencial) por lo que:

$V_T \text{ interno} \approx 0 - 6 V$ cumple sobrado 30V.

Persona en el agua tocando casco.

Potencial del agua a 1m del casco:

Ecuación 35. Cálculo de la tensión de toque.

$$V(r) = \frac{\rho * I_f}{2\pi}, \quad r = a + 1 \quad (35)$$

$$V_{agua}(a + 1) \approx \frac{41.7}{10.12 + 1} \approx 3.75V$$

Toque casco-agua a 1m:

Ecuación 36. Cálculo de la tensión de toque con casco-agua a 1 metro.

$$V_T \approx GPR - V_{agua}(a + 1) \quad (36)$$

$$V_T \approx 6.5 - 3.75$$

$$V_T \approx 2.7V$$

Cumple 30V

Tensión de paso.

$$E(r) \approx \frac{\rho * I_f}{2 * \pi * r^2}$$

A 1m del casco y paso de 1m

Ecuación 37. Cálculo de la tensión de toque a 1 metro del caso y paso de 1 metro.

$$V_p(1m) \approx E(1) * 1 \approx \frac{0.2 * 1310}{2 * \pi} = 41.7V \quad (37)$$

No cumple con 50 V, pero no cumple en escenario conservador 30 V.

De acuerdo con IEEE Std 80-2013 e IEC 60479-1, el límite general de tensión de contacto seguro en sistemas de baja tensión es 50 V. Sin embargo, en condiciones de ambiente húmedo o marino, la impedancia corporal disminuye significativamente, motivo por el

cual normas específicas como ABYC E-11 y recomendaciones de IEEE Std 45 reducen el umbral a 30 V, valor adoptado en este proyecto como criterio de diseño conservador.

5.1.4.2.4. AISLADOR GALVÁNICO.

Normativa de referencia.

ABYC A-28 – Galvanic Isolators: define construcción, ensayo (“fail-safe”), caída de tensión máxima y requisitos de certificación (UL).

ABYC E-11 / IEEE-45 (referencial): el GI se coloca solo en el EGC del servicio de muelle; no debe interrumpir el bonding interno del barco.

Selección recomendada (de acuerdo con el breaker de muelle destinado a nuestra embarcación): ProSafe FS60

Se conecta su entrada en serie a la línea de tierra proveniente del muelle, su salida directa al bonding bus bar, se sitúa en T3 en sala de máquinas.

5.1.4.2.5. MONITOR DE AISLAMIENTO (IMD).

Marco normativo.

IEC 61557-8: especifica los requisitos de diseño, funcionamiento y precisión de los IMD en sistemas IT.

IEEE Std 45 (Shipboard Electrical Installations): recomienda la supervisión permanente del aislamiento en embarcaciones con neutro no puesto a tierra.

ABYC E-11: reconoce el uso de IMD en instalaciones AC marinas como medida de seguridad adicional, sobre todo en sistemas flotantes.

Estas normas coinciden en que el IMD es parte del SPT, ya que asegura la detección temprana de fallas de aislamiento que podrían generar corrientes peligrosas hacia el casco y el mar. Para el presente proyecto (127/220 V trifásico + neutro, generadores de 100 kVA), el IMD debe cumplir:

- Compatibilidad de tensión: apto para 127/220 V, 50/60 Hz, trifásico + N.
- Umbral ajustable de alarma: típicamente 50–100 k Ω .
- Indicación y alarmas: display local, contactos libres de potencial para integrar a alarmas en sala de control o puente.

- Cumplimiento IEC 61557-8 y ensayos de compatibilidad EMC.
- Construcción marina: apto para ambientes húmedos, vibración, y con bornes de conexión estañados o recubiertos.

5.2. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN EN EL PROGRAMA DE ANALIZADOR DE TRANSITORIOS ELÉCTRICOS – ELECTRICAL TRANSIENT ANALYZER PROGRAM (ETAP).

La metodología desarrollada para el sistema de generación para fines educativos se tomó de referencia el dato de placa de una embarcación cotidiana de 135 KW considerando el diseño del SPT de embarcaciones tipo yate con las frecuencias de tipo industrial y rayo.

5.2.1. MODELADO DEL GENERADOR.

De acuerdo con el Diagrama Unifilar General descrito en el numeral 3.1.5., se procedió a la elaboración del modelo del Sistema Eléctrico de la embarcación utilizando el programa de alta ingeniería ETAP. En primera instancia se estableció el modelo del generador principal de 135 kW, incorporando los parámetros eléctricos y operativos proporcionados por el fabricante. La figura 20 muestra los valores técnicos de referencia, mientras que en la figura 21 se detalla el proceso de parametrización dentro diseño en ETAP.

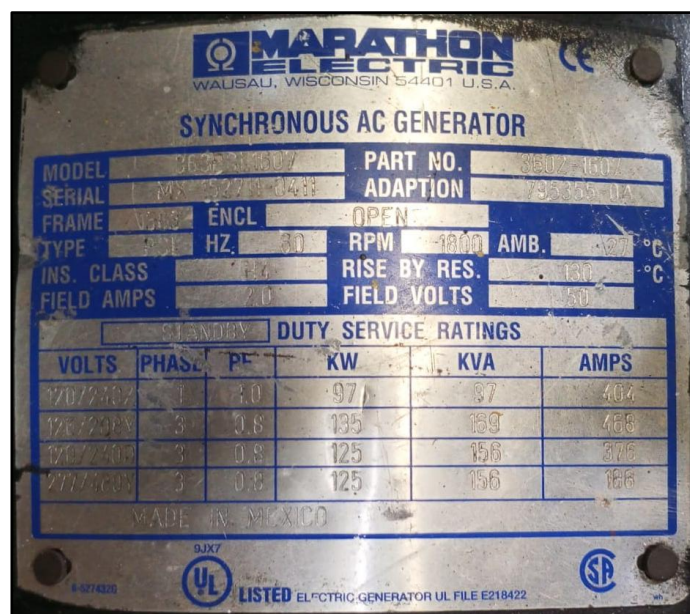


Figura 20. Datos de placa del Generador del yate.

Fuente: El Autor.

Synchronous Generator Editor - Generator

Harmonic Info Rating Capability Imp/Model Grounding Inertia Exciter Governor PSS

0.208 kV 0.135 MW Swing

Rating

MW kV % PF MVA % Eff. Poles

0.135 0.208 80 0.169 95 4

% of Bus Nom. kV FLA RPM

100 468.4 1800

Gen. Category	% V	Angle	MW	Mvar	% PF	Qmax	Qmir
1 Design	100	0					
2 Normal	100	0					
3 Shutdown	100	0					
4 Emergency	100	0					
5 Standby	100	0					

Prime Mover Rating

Continuous HP MW HP MW

181 0.135 181 0.135

Mvar Limits

Capability Curve User-Defined

Peak Mvar

0.0837

Operating Values

% V Vangle MW Mvar

100 0 0.106 0.0686

Generator OK Cancel

Synchronous Generator Editor - Generator

Harmonic Info Rating Capability Imp/Model Grounding Inertia Exciter Governor PSS

0.208 kV 0.135 MW Swing

Impedance

% Ohm

Xd 19 Xd'/Ra 19 Ra 1 Ra 0.002564

X2 18 X2/R2 9 R2 2 R2 0.005128

X0 7 X0/R0 7 R0 1 R0 0.002564

Rdc 0 Rdc 0

Xd' Tolerance

0 %

Inertia

H 0

Dynamic Model

% % Sec

Subtransient Xd 2.41 Xq 2.41 Td0 6.5 Sbreak 0.8

Transient Xdu 2.41 Xqu 2.41 S100 1.07

Equivalent Xd' 0.152 S120 1.18

Typical Data X_L 1 Damping 0

Type

Gen. Steam Turbo

Rotor Round-Rotor

IEC 60909 S.C.

Exciter Type Turbine 130%

Compound Exc.

Adjust KG based on PG PG 7.5 %

GOST S.C.

Exciter Type Thyristor Self-Excitation

Generator OK Cancel

Figura 21. Datos del Generador ingresados en ETAP.

Fuente: El Autor.

5.2.2. MODELADO DEL DISYUNTOR DEL GENERADOR.

El Generador del Sistema Eléctrico del yate cuenta con un disyuntor, cuya intención es ofrecer protección frente a sobrecargas y fallas que puedan complicar la integridad del equipo y la estabilidad del sistema. En la figura 22 se presenta la ampacidad del generador, considerando su potencia nominal de 135 kW, FP de 0,8 y una tensión de 0,208 kV. Para efectos del modelado en ETAP, el disyuntor fue representado mediante un *Fuse*, aunque el equipo real opera con una corriente de disparo ajustada a 320 A, en el entorno de simulación se utilizó un fusible con corriente nominal de 400 A, como se detalla en la figura 23.



Figura 22. Datos del disyuntor del Generador.

Fuente: El Autor.

Figura 23. Datos del disyuntor del Generador ingresados en ETAP.

Fuente: El Autor.

5.2.3. MODELADO DEL BARRAJE DEL GENERADOR.

Las acometidas de baja tensión (BT) derivados de la salida del disyuntor, expuestas en la figura 24, se conectan a un sistema de barrajes destinado a distribuir la energía eléctrica hacia las diferentes cargas operativas del yate. Para efectos del modelado en ETAP, el barraje fue representado mediante un elemento tipo *Bus Barra*, en el cual se integraron los parámetros eléctricos correspondientes tales como; nivel de tensión, capacidad de corriente y contribución al nivel de cortocircuito dentro del sistema eléctrico, los datos técnicos empleados en esta parametrización se dan a conocer en la figura 25.



Figura 24. Barraje del Generador.

Fuente: El Autor.

Figura 25. Datos del Barraje del Generador ingresados en ETAP.

Fuente: El Autor.

5.2.4. MODELADO DE LAS ACOMETIDAS DE BAJA TENSIÓN (BT).

Desde el barraje principal del Generador del Sistema Eléctrico hasta el barraje de distribución de cargas, el sistema de cableado de BT fue modelado en ETAP a través el elemento *Transmission Line*, con el fin de simbolizar con precisión las características eléctricas y físicas del cableado real. En este trayecto se incorporan las acometidas trifásicas conformadas por el conductor 300 KCMIL 3/C DPNP MARINE SHIPBOARD CABLE 90°C – 600 V E86047 (UL) 1988, delineado concretamente para aplicaciones marinas, así como el conductor de neutro 1/0 AWG 600 V (INCABLE INCAPLAST TW), estos tipos de conductores se detallan en las figuras 26 y 27 manifiestan la disposición del cableado dentro del sistema eléctrico del yate.

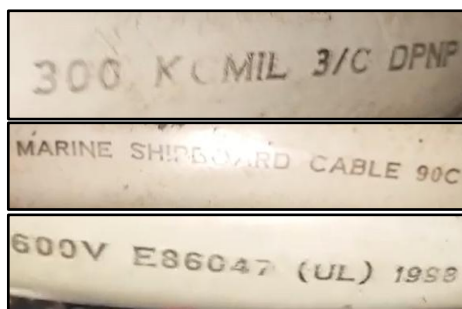


Figura 26. Conductor 300 KCMIL 3/C DPNP MARINE SHIPBOARD CABLE 90°C – 600 V E86047 (UL) 1988.

Fuente: El Autor.



Figura 27. Conductor de neutro 1/0 AWG 600 V (INCABLE INCAPLAST TW).

Fuente: El Autor.

Las figuras 28 y 29 se visualiza la parametrización empleada en el programa, con el fin de garantizar un modelado adecuado de las pérdidas eléctricas, la caída de tensión y el comportamiento ante corrientes de cortocircuito, se estableció la longitud real considerada del tendido, tomando como referencia la eslora de la embarcación de 39 metros y añadiendo márgenes operativos y reservas técnicas. De esta manera, la longitud total modelada del circuito se definió en 75 metros, permitiendo obtener resultados más exactos en los análisis de flujo de carga, capacidad de conducción de corriente y desempeño térmico del cableado en condiciones normales y de falla.

Figura 28. Datos Principales de los Conductores ingresados en ETAP.

Fuente: El Autor.

Figura 29. Definición de los tipos de conductores ingresados en ETAP.

Fuente: El Autor.

5.2.5. MODELADO DEL BARRAJE DE LA CARGA.

Una vez modeladas las acometidas de BT se procedió a definir el conexionado hacia el Barraje de Carga, cuya representación gráfica se visualiza en la figura 30, aquel barraje constituye el punto central de distribución desde el cual se alimentan las distintas cargas del yate, entre ellas las asociadas al Panel 12 V. DC “Sala de Máquinas” Plano 01PM (figura 17) y el Diagrama Unifilar General Plano 01PP. (figura 18). Su función es atestiguar una coordinación apropiada entre los diversos circuitos derivados, manteniendo la continuidad operativa y una correcta selectividad en la distribución de energía. La figura 31 presenta los datos técnicos empleados en esta parametrización, los cuales reflejan adecuadamente el comportamiento real del barraje dentro de la arquitectura eléctrica del yate y proporcionan la ejecución de los análisis posteriores, tales como flujo de carga, análisis de fallas y evaluación de las protecciones.

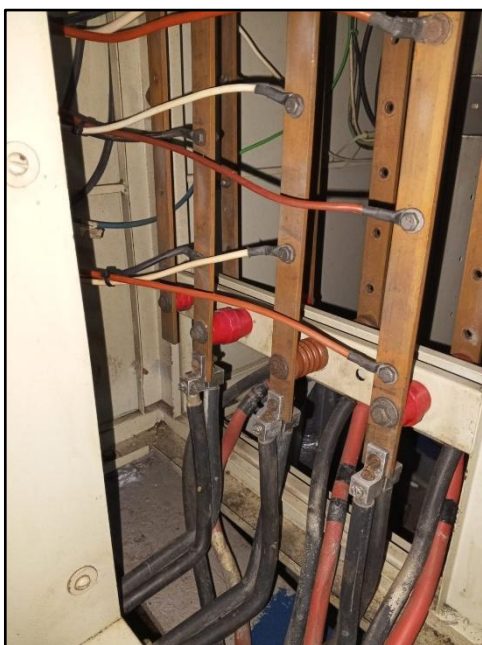


Figura 30. Barraje de la Carga.

Fuente: El Autor.

Info	Phase V	Load	Motor/Gen	Remarks	Arc Flash	Protection
0.208 kV 0 Amps Symmetrical 0 kA						
Info ID: Barra Carga Nominal kV: 0.208 Bus Voltage: Initial 100 % V, 0.208 kV, 0 Angle; Operating 92.598 % V, 0.193 kV, -1.2 Angle						
Equipment Tag #: Name: Description: Priority: Critical						
Classification Zone: 1 Area: 1 Region: 1						
Revision Data Base: Condition: Service In, State As-Built						
Connection 3 Phase, 1 Phase 2W, 1 Phase 3W						
Load Diversity Factor Min: 80 %, Max: 125 %						
Voltage Limit Min: 90 %, Duration: 0 Cycle						

Figura 31. Datos del Barraje de la Carga ingresados en ETAP.

Fuente: El Autor.

5.2.6. MODELADO DEL DISYUNTOR DE LA CARGA.

Para la representación del modelo del disyuntor de la carga se tomó de referencia el mismo disyuntor del generador, efectuando el análisis de las diversas cargas del yate, entre ellas; luces de navegación, reflectores, radares y entre otros, dado que se ha tenido

un alcance del 80% de la carga nominal que puede entregar el generador se reflejó una carga total de 108 KW, con este dato se modeló el Fuse de ETAP con una corriente nominal de 400 amperios. Para la representación del disyuntor del barraje de carga, se tomó como referencia el equivalente del disyuntor empleado en el generador, tal como se muestra en la figura 32. En base a este valor de demanda y en la necesidad de mantener criterios de selectividad el dispositivo de protección fue modelado en ETAP mediante un elemento tipo *Fuse*, configurado con una corriente nominal de 400 A, tal como se da a conocer en la figura 33.



Figura 32. Datos del disyuntor de la Carga.

Fuente: El Autor.

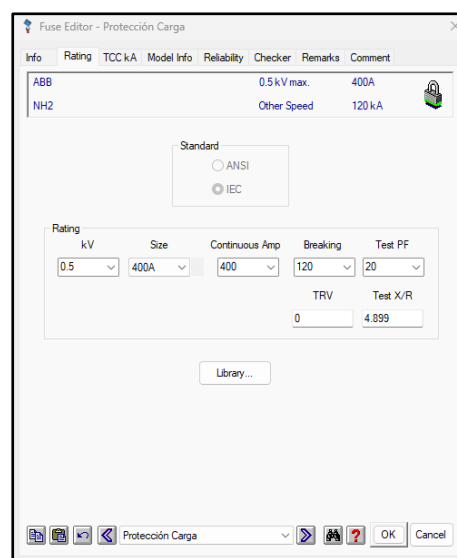


Figura 33. Datos del disyuntor de la Carga ingresados en ETAP.

Fuente: El Autor.

5.2.7. MODELADO DE LA CARGA TOTAL DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL YATE.

En la figura 34 se exhibe una vista general de la embarcación, enfatizando la distribución de las diferentes cargas del sistema eléctrico, tales como; luces de navegación, reflectores, radares y demás equipos instalados. Adicionalmente, la figura 35 detalla el medidor eléctrico analógico de 300/5 amperios, mediante el cual se evidencia un consumo equivalente al 80% de la capacidad del generador, es decir, alrededor de 108 kW respecto a su potencia nominal de 135 kW. Definida la demanda total del sistema eléctrico, se procedió a modelar en ETAP empleando el elemento *Lumped Load*, en el cual se integraron los parámetros eléctricos nivel de potencia activa y reactiva, FP y tensión, tal como se muestra en la figura 36..



Figura 34. Fotografía de la embarcación y sus diversas cargas luces de navegación, reflectores, radares y entre otros.

Fuente: El Autor.



Figura 35. Medición en tiempo real de la Línea L2 de la Carga Total de la embarcación.

Fuente: El Autor.

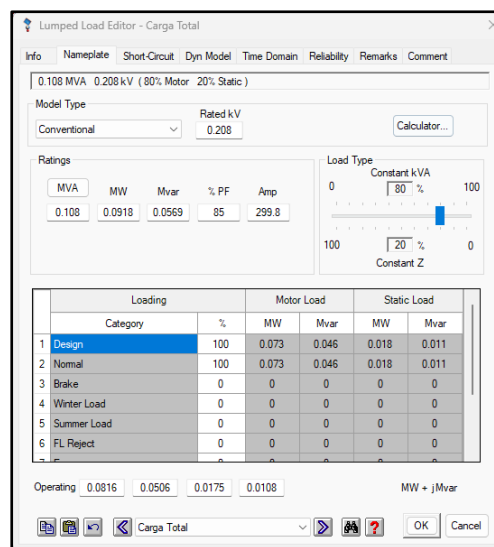


Figura 36. Datos del disyuntor de la Carga ingresados en ETAP.

Fuente: El Autor.

5.2.8. ANÁLISIS DEL FLUJO DE CARGA.

Una vez completada la parametrización de todos los elementos que conforman el Sistema Eléctrico de la embarcación en ETAP, se procedió a efectuar el conexionado integral de cada componente, con el fin de instaurar el diseño definitivo del diagrama unifilar. Este proceso logró verificar la correcta interrelación entre los equipos de generación, protección, distribución y carga, certificando la coherencia estructural del modelo para los análisis posteriores. La figura 37 muestra la disposición final del unifilar desarrollado en ETAP.

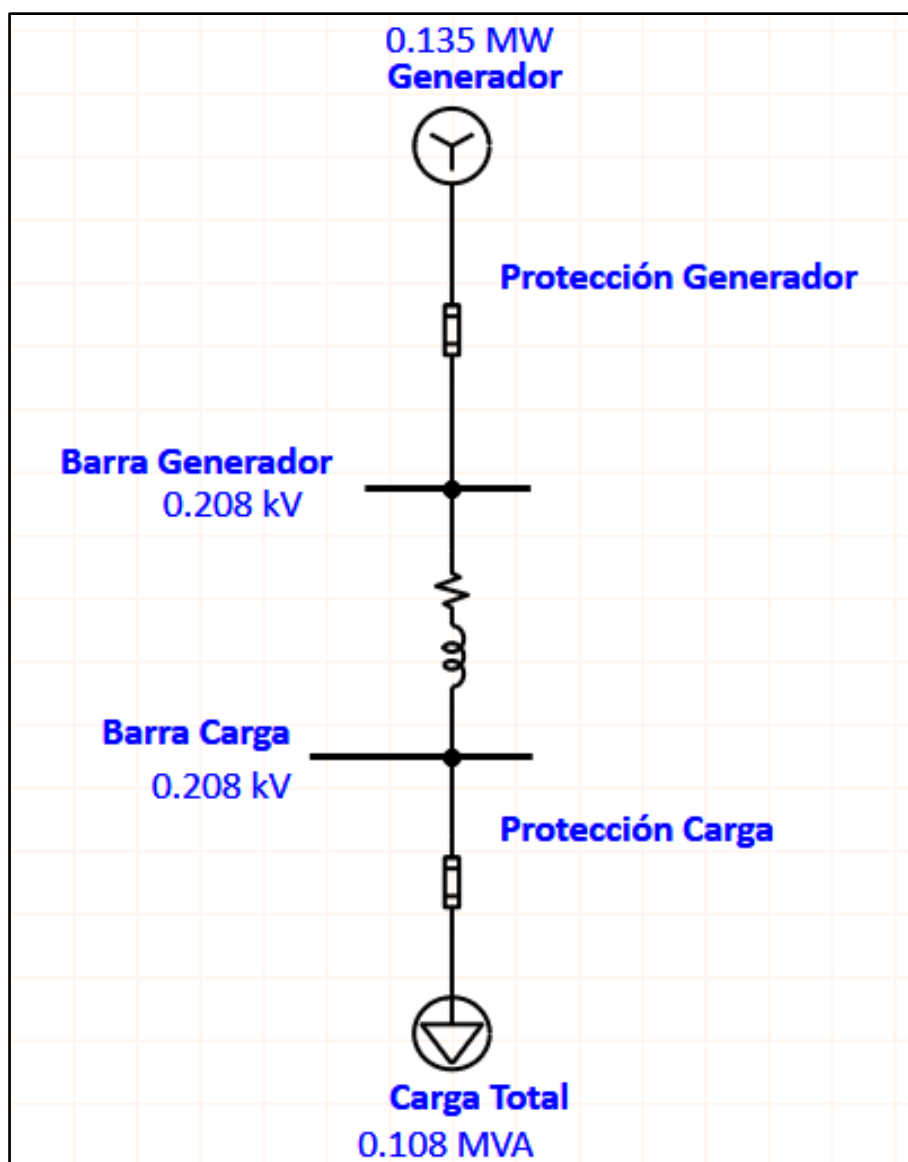


Figura 37. Diseño del diagrama unifilar del sistema eléctrico de la embarcación en ETAP.

Fuente: El Autor.

Con el diagrama unifilar definido se procedió a establecer el análisis de flujo de carga con la intención de verificar y validar el comportamiento operativo del sistema eléctrico bajo condiciones nominales. En la figura 38 se personifican los resultados derivados del flujo de carga donde se observan los perfiles de tensión en cada barra, expresados en porcentaje respecto a la tensión base, así como las corrientes que circulan a través de los diversos alimentadores (conductores) del Sistema Eléctrico de la embarcación. En el Anexo 13 se detallan todas las variables eléctricas calculadas durante el estudio, incluyendo potencias

activa y reactiva, pérdidas, niveles de carga de los conductores y factores de operación involucrados en el modelo desarrollado.

5.2.9. ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO

Una vez validado el flujo de carga, se ejecutó el análisis de cortocircuito en el barraje del generador, considerando la condición de falla máxima mediante los escenarios: 3-Phase, LG, LL y LLG (1/2 Cycle). La figura 39 da a conocer los parámetros eléctricos obtenidos en el análisis, incluyendo los valores de tensión, el módulo y la dirección de la corriente de cortocircuito de la falla simulada, estos resultados permiten establecer la eficacia de los dispositivos de protección en la detección y despeje oportuno de fallas, aseverando una operación selectiva y confiable del sistema eléctrico de la embarcación.

En el Anexo 14 se presentan todas las variables eléctricas calculadas en el estudio de cortocircuito, como son; resistencias y reactancias equivalentes, magnitud y dirección de las componentes de corriente, además de varios parámetros importante utilizados para validar el diseño del Sistema Eléctrico de embarcación.

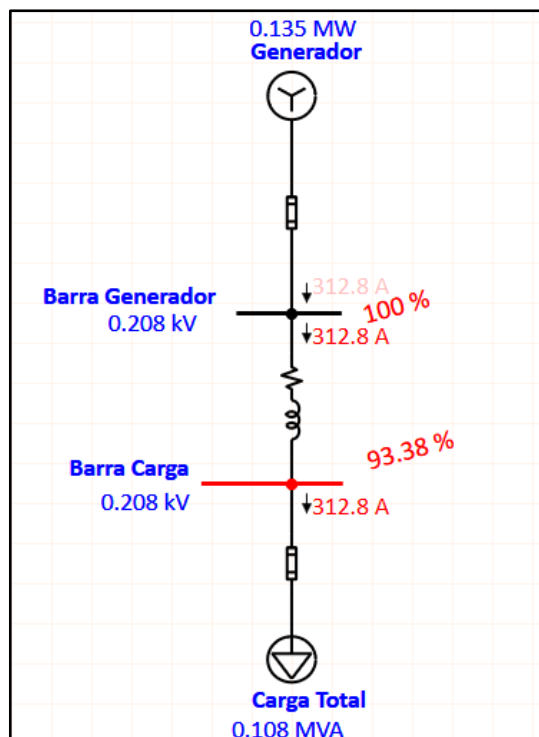


Figura 38. Flujo de Carga del sistema eléctrico de la embarcación en ETAP.

Fuente: El Autor.

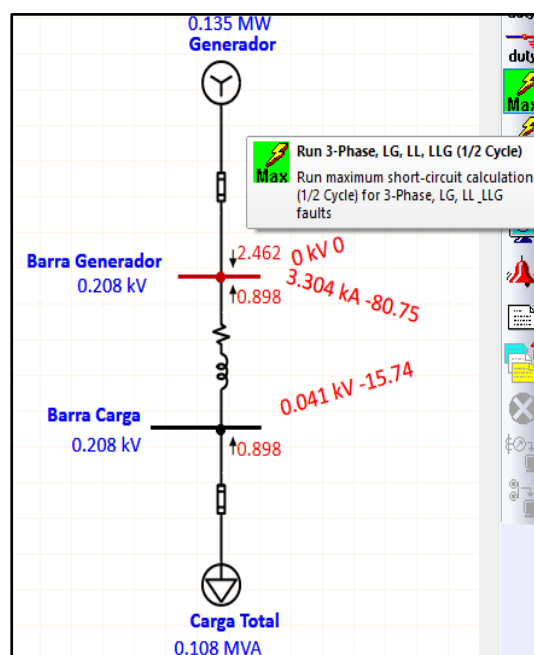


Figura 39. Análisis de cortocircuito del sistema eléctrico de la embarcación en ETAP.

Fuente: El Autor.

6. CAPÍTULO VI.

6.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El presente capítulo expone los resultados obtenidos de la aplicación metodológica desarrollada en el capítulo anterior. El análisis se centra en comparar el estado actual de la embarcación, la cual opera sin un SPT ni un LPS, y carece de dispositivos de protección complementarios como DPS, IMD, aislador galvánico y anillos colectores, frente al estado proyectado que incorpora las medidas de diseño propuestas.

La validación se realiza contrastando los resultados de los cálculos efectuados —área de captura equivalente, número anual de eventos, índice de riesgo, tensiones de toque, paso y gradiente, impedancias de ánodos, entre otros con los límites establecidos en las normas internacionales (IEC 62305, IEEE Std 45, ABYC E-11, IEC 60479-1, ASTM B843, IEC 61557-8, entre otras).

De esta manera, el capítulo busca demostrar que la implementación de los sistemas propuestos reduce significativamente el riesgo eléctrico y los efectos de la corrosión galvánica, asegurando la seguridad de pasajeros y tripulación, así como la protección de los equipos eléctricos y de la estructura metálica del casco.

6.1.1. ESTADO ACTUAL DE LA EMBARCACIÓN.

En la situación actual, la embarcación carece de sistemas de protección eléctrica y contra descargas atmosféricas, lo que incrementa de forma significativa los riesgos operativos, de seguridad y de corrosión. En la siguiente tabla se resumen las principales carencias y los riesgos asociados:

Elemento	Estado actual	Riesgo asociado
Sistema de puesta a tierra (SPT)	Inexistente: no hay barras colectoras ni bonding bus bar.	Ausencia de equipotencialidad; tensiones de contacto peligrosas.
LPS	No cuenta con captadores, bajantes ni placa de disipación.	Alta exposición a descargas atmosféricas en zona de riesgo (Galápagos).

Protección contra sobretensiones (DPS)	Ningún tablero tiene DPS.	Vulnerabilidad de equipos críticos ($\approx$ USD 250.000) ante sobretensiones.
Monitor de aislamiento (IMD)	No instalado en sistema IT.	La primera falla a tierra no es detectada; riesgo de cortocircuito en segunda falla.
Aislador galvánico	Ausente en conexión de shore power.	Circulación de corrientes galvánicas casco–muelle $\rightarrow$ corrosión acelerada.
Anillos colectores (PSE)	No instalados en ejes propulsores.	Erosión eléctrica en cojinetes y acoples $\rightarrow$ mayor desgaste y costos de mantenimiento.

Tabla 8. Riesgo asociado y el estado actual de la embarcación.

Fuente: El autor.

6.1.2. ESTADO PROYECTADO CON IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS.

Tras la aplicación de la metodología propuesta en el capítulo anterior, la embarcación pasaría a disponer de un sistema integral de protección eléctrica y contra descargas atmosféricas. En la siguiente tabla se resume el estado proyectado de cada subsistema, comparado con la condición inicial:

Elemento	Estado actual	Estado proyectado
Sistema de puesta a tierra (SPT)	Inexistente: no hay barras colectoras ni bonding bus bar.	Instalación de bonding bus bar, barras colectoras por subsistema y conexión a ánodo principal $\rightarrow$ equipotencialidad total.
LPS	No cuenta con captadores, bajantes ni placa de disipación.	Captador aéreo de 12 m, dos bajantes paralelas, placa sumergida dedicada; trayectoria de baja impedancia.

Protección contra sobretensiones (DPS)	Ningún tablero tiene DPS.	Incorporación de DPS tipo 1+2 en tablero principal y tipo 2 en tableros secundarios.
Monitor de aislamiento (IMD)	No instalado en sistema IT.	Instalación de IMD Vigilohm IM400 (Schneider), umbral ajustable 50–100 k Ω , alarmas locales y remotas.
Aislador galvánico	Ausente en conexión de shore power.	Instalación de aislador galvánico marino en conductor de tierra de acometida, conforme ABYC A-28.
Anillos colectores (PSE)	No instalados en ejes propulsores.	Instalación de slipring Cu/Ag, doble portacepillos Ag/C 80 %, conexión 25 mm ² a casco, módulo de monitoreo 0–500 mV.

Tabla 9. Estado proyectado con implementación de medidas.

Fuente: El autor.

6.1.3. VALIDACIÓN TÉCNICA.

La validación de los resultados obtenidos se realiza contrastando cada cálculo y selección de componentes con los criterios establecidos en normas internacionales aplicables a instalaciones eléctricas marinas y sistemas de protección contra descargas atmosféricas. Este proceso permite verificar que el diseño propuesto no solo cumple con los requerimientos técnicos, sino que también garantiza un nivel de seguridad aceptable para la tripulación, pasajeros y equipos a bordo.

6.1.3.1. VALIDACIÓN DE NIVEL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS LPL.

En el capítulo 5 se calcularon los parámetros principales:

- $N_g = 12$ descargas/km²·año (zona marítima Galápagos, dato conservador).
- Altura característica $h = 12$ m.
- Área de captura equivalente $A_c = 471$ m².

- Número anual de eventos peligrosos (N_{direct}) $\approx 0,0231 \text{ a}^{-1} \rightarrow 1$ impacto cada ~ 43 años.
- Índice de riesgo económico (EAL):
 - Para equipos sensibles (USD 250.000): $\approx 2.023 \text{ USD/año}$.
 - Para toda la instalación eléctrica (USD 2.500.000): $\approx 8.669 \text{ USD/año}$.

Comparación normativa (IEC 62305-2)

La norma IEC 62305-2 establece un índice de riesgo permitido N_p dependiendo del tipo de estructura:

- Estructuras ordinarias: $N_p \approx 10^{-3}$ a 10^{-4} impactos/año.
- Estructuras con riesgo humano y alto valor económico (caso del yate): $N_p \leq 10^{-5}$ impactos/año.

En este caso:

- N_r calculado = $0,0231 \text{ a}^{-1}$, que es muy superior al valor permitido $N_p \leq 10^{-5}$.
- Esto confirma que la embarcación requiere obligatoriamente un LPS.

Selección del Nivel de Protección contra Rayos (LPL)

Según IEC 62305-1:

- LPL I: Riesgo muy alto (corrientes de rayo hasta 200 kA).
- LPL II: Riesgo alto (corrientes hasta 150 kA).
- LPL III-IV: Riesgo medio/bajo (corrientes hasta 100 kA).

Dado que:

1. El valor de N_r está muy por encima de N_p .
2. La embarcación transporta personas (25 pasajeros + 7 tripulación).
3. El valor económico de los equipos supera USD 2,5 millones.

Se recomienda seleccionar un LPL II como nivel de protección mínimo aceptable, asegurando que el sistema de captación y descarga soportes corrientes de hasta 150 kA, con baja impedancia hacia el mar.

El análisis comparativo se organiza en subapartados, donde se valida:

- El nivel de protección contra rayos (LPL) frente a IEC 62305-2.

- Las tensiones de seguridad (toque, paso, gradientes) frente a IEC 60479-1 y criterios marinos.
- La resistencia e impedancia de los ánodos frente a ASTM B843.
- La protección contra sobretensiones (DPS) según IEC 61643-11.
- El uso de IMD y aislador galvánico conforme a IEEE Std 45 y ABYC.
- La incorporación de anillos colectores según prácticas de clasificación naval.

6.1.3.2. VALIDACIÓN DE TENSIONES DE SEGURIDAD.

En el capítulo 5 se calcularon los valores de tensión de toque, paso y gradiente de tensión para el sistema de puesta a tierra propuesto.

Según la norma IEC 60479-1, la tensión de seguridad en condiciones ordinarias de contacto indirecto no debe superar los 50 V en sistemas de baja tensión. Sin embargo, en ambientes de alta conductividad y elevada humedad, como es el caso del entorno marino, se recomienda aplicar un criterio más conservador de 30 V como límite máximo de seguridad (referencia adoptada en normas de clasificación naval y en criterios de la IEEE Std 45 para buques).

- Tensión de toque (V_t): Los valores calculados en los puntos de equipotencialidad se mantuvieron por debajo del límite de 30 V, garantizando que una persona que entre en contacto con una superficie metálica conectada al bonding bus bar no estará expuesta a tensiones peligrosas.
- Tensión de paso (V_p): A bordo este fenómeno es menos crítico que en tierra firme, ya que el casco metálico proporciona una superficie conductora equipotencial. No obstante, los valores simulados se encuentran también por debajo de los límites de 30 V.
- Gradiente de Tensión (∇V): El análisis mostró que el diseño del sistema de puesta a tierra mantiene gradientes bajos en las zonas de conexión de ánodos y de la placa sumergida, evitando diferencias significativas de potencial en el casco que pudieran ser peligrosas para tripulación y pasajeros.

Validación normativa

- Criterio IEC 60479-1: límite de 50 V en ambientes ordinarios.
- Criterio aplicado en diseño marino: límite conservador de 30 V.

- Resultado: Los valores calculados cumplen con el límite de 30 V, lo que valida la seguridad del sistema propuesto frente a tensiones de contacto en la embarcación.

6.1.3.3. VALIDACIÓN DE IMPEDANCIA Y DIMENSIONAMIENTO DE ÁNODOS.

En el capítulo 5 se calculó el número, masa y distribución de los ánodos de sacrificio que garantizan la protección catódica del casco y al mismo tiempo sirven como electrodos de referencia para el sistema de puesta a tierra.

Normativa aplicable

- ASTM B843: define los requisitos para materiales de ánodos (zinc, aluminio, aleaciones Cu–Ni) y su resistencia a la corrosión en agua de mar.
- NACE SP0176 / IEEE Std 45: recomiendan densidades de corriente en fase inicial (0,10–0,20 A/m²) y de mantenimiento (0,01–0,02 A/m²) para cascos pintados.
- IEC 62305-3: sugiere que la resistencia de puesta a tierra para LPS/SPT debe ser lo más baja posible (<10 Ω en estructuras terrestres; en ambiente marino, <1 Ω es alcanzable).

Resultados obtenidos

- WSA (área mojada del casco): $\approx 223 \text{ m}^2$.
- Corriente requerida:
 - Fase inicial: $\approx 26 \text{ A}$.
 - Fase de mantenimiento: $\approx 2,3 \text{ A}$.
- Carga total para 3 años (vida entre varadas): $\approx 2.100 \text{ Ah}$.
- Configuración adoptada: 10 ánodos distribuidos a lo largo del casco, más un ánodo principal enlazado al bonding bus bar.
- Impedancia a 60 Hz: baja (<1 Ω), garantizando drenaje de corrientes de fuga.
- Impedancia a alta frecuencia (descargas transitorias): en el orden de miliOhmios, lo que asegura trayectoria eficaz para disipar sobretensiones rápidas.

Validación

- El material seleccionado (zinc marino ASTM B843) cumple con las especificaciones para agua salada.

- La densidad de corriente calculada se encuentra dentro de los rangos NACE/IEEE, garantizando protección anticorrosiva y eléctrica.
- El sistema proyectado cumple con el criterio de baja impedancia exigido por IEC 62305-3 para conexión al LPS.

6.1.4. PRUEBA DE ELECTRODO DE CLORURO DE PLATA.

Una vez implementado el sistema de puesta a tierra (SPT) con los ánodos de sacrificio proyectados, se espera realizar la prueba de potencial utilizando un electrodo de referencia de cloruro de plata (Ag/AgCl, agua de mar). Esta verificación permite comprobar en campo el grado de protección catódica alcanzado por el casco metálico de la embarcación.

Esta prueba me permite verificar la tensión de referencia de la embarcación con respecto al agua, dependiendo del rango de tensión medido, podremos determinar si nuestra embarcación está protegida adecuadamente.

El procedimiento consiste en sumergir el electrodo de referencia próximo al casco y medir, mediante un voltímetro de alta impedancia, la diferencia de potencial entre el casco (conectado al bonding bus bar) y el electrodo.

Según NACE SP0176 y criterios de clasificación naval, la protección se considera adecuada si los valores medidos se encuentran en el rango de $-0,80\text{ V}$ a $-1,05\text{ V}$ vs. Ag/AgCl.

- Valores más positivos ($> -0,80\text{ V}$) indican protección insuficiente.
- Valores más negativos ($< -1,10\text{ V}$) indican sobreprotección, con riesgo de desprendimiento de hidrógeno y daño a recubrimientos.

De este modo, la prueba de potencial con electrodo de cloruro de plata constituye la etapa final de validación práctica del diseño, asegurando que el sistema de puesta a tierra cumple su función protectora bajo condiciones reales de operación.

Lectura del Medidor (voltios DC)	Estado de Protección Catódica (Corrosión)
Más positivo que (-0,7)	No protección
Entre (-0,7) y (-0,8)	Protección inadecuada
Entre (-0,8) y (-0,95)	Adecuadamente protegido
Entre (-0,95) y (-1,05)	Debidamente protegido - Rango alto No recomendado para cascos de aluminio
Más negativo que (-1,05)	Over Protected

Figura 40. Estados de protección catódica con respecto a la lectura del medidor.

Fuente: [10].

6.1.5. ESQUEMA GRÁFICO SPT Y LPS.

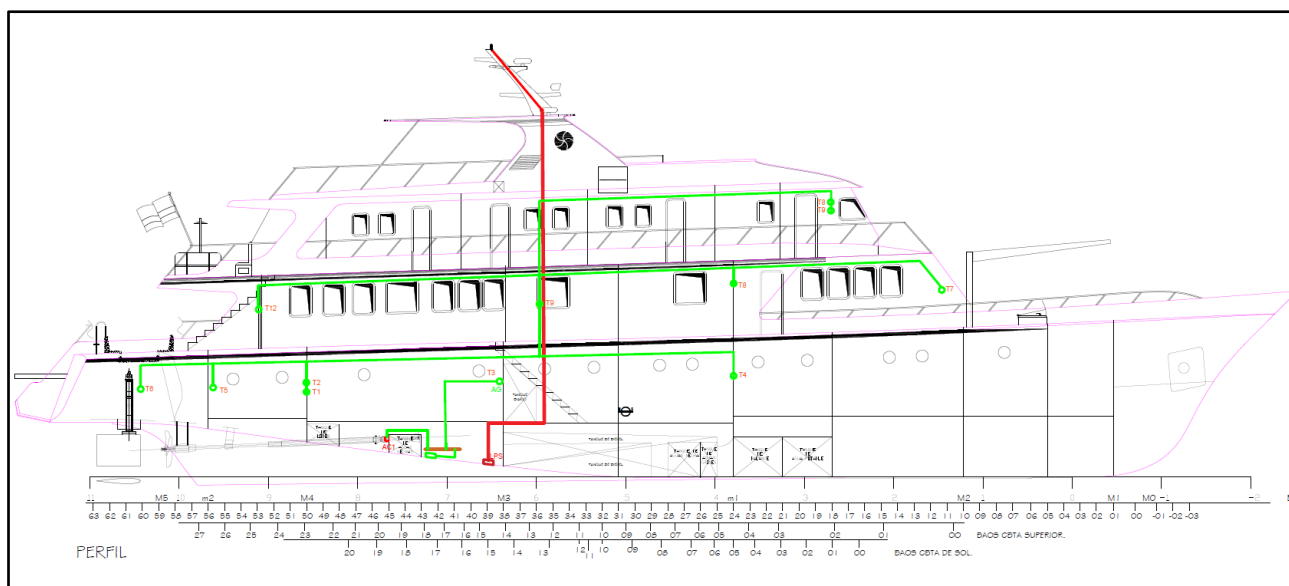


Figura 41. Perfil embarcación.

Fuente: El autor.

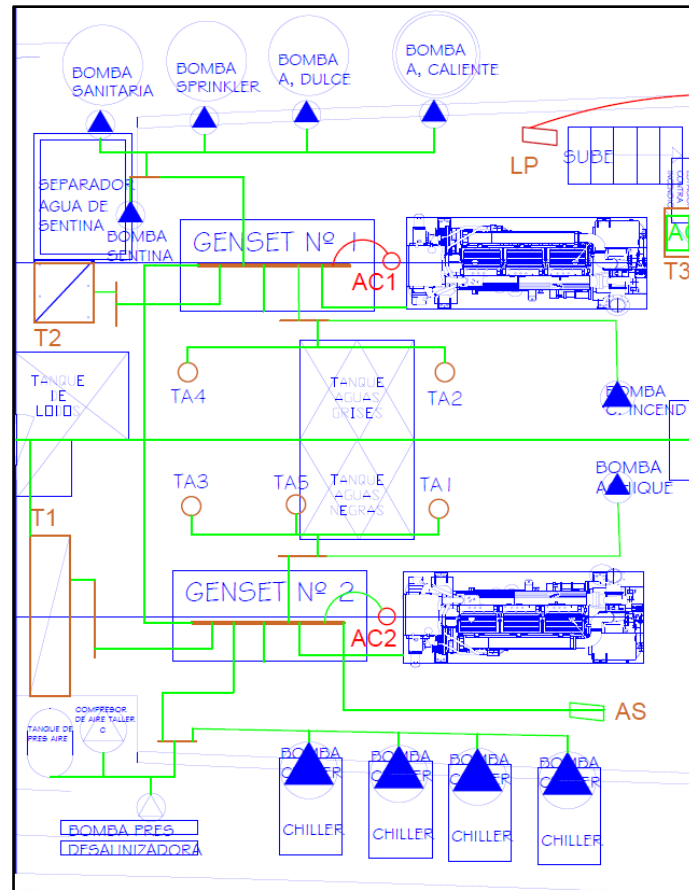


Figura 42. Lazo de tierra en sala de máquinas.

Fuente: El autor.

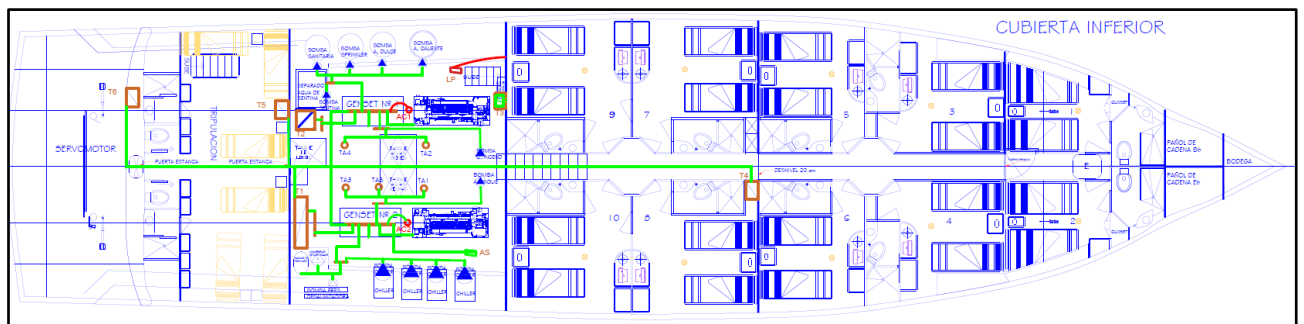


Figura 43. Ruta de tierra cubierta inferior.

Fuente: El autor.

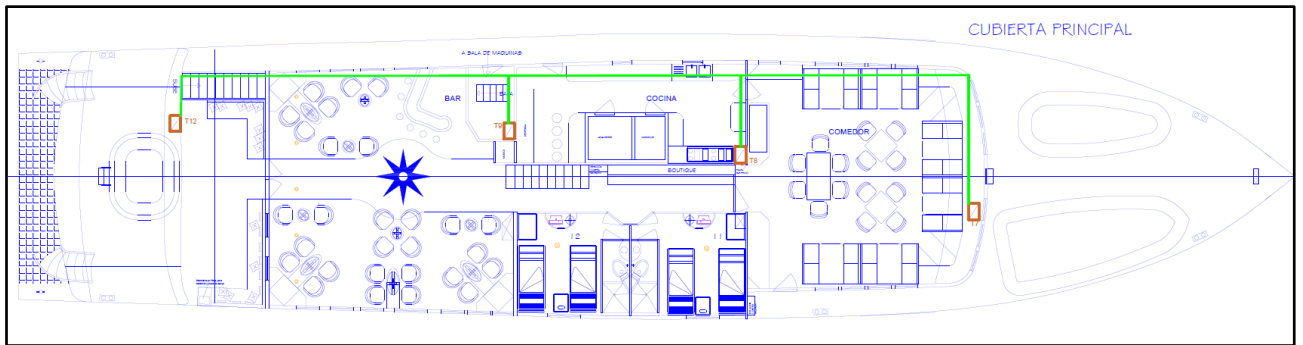


Figura 44. Ruta de tierra cubierta principal.

Fuente: El autor.

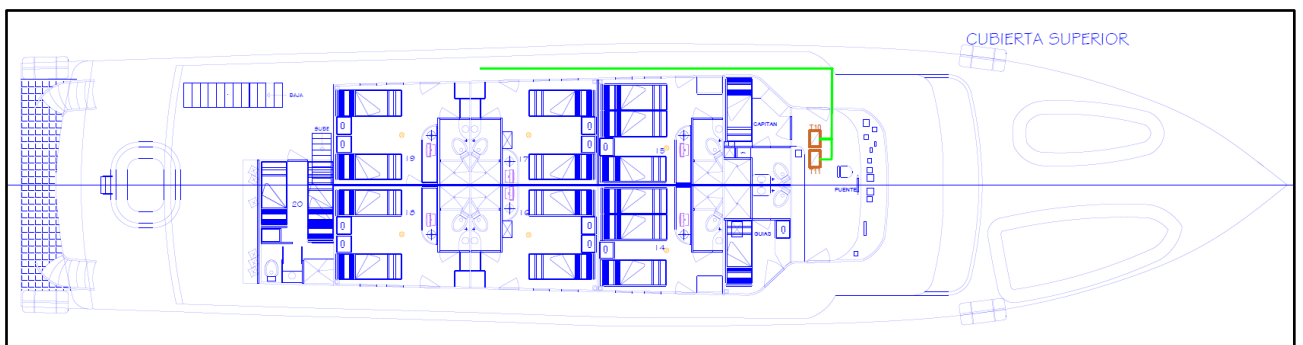


Figura 45. Ruta de tierra cubierta superior.

Fuente: El autor.

CONCLUSIONES

El análisis realizado evidenció que la embarcación, en su estado inicial, operaba sin sistemas básicos de seguridad eléctrica y protección contra fenómenos naturales, ya que no contaba con SPT, LPS, dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS), ni elementos de supervisión como el monitor de aislamiento (IMD) o aisladores galvánicos. Esta condición generaba vulnerabilidades críticas tanto para la seguridad de la tripulación y pasajeros como para la integridad de los equipos eléctricos y electrónicos, cuyo valor se estima en 2,5 millones de dólares.

La metodología propuesta permitió diseñar un sistema integral acorde a normas internacionales que garantizan la aplicabilidad en entornos marinos. El diseño incluyó la implementación de un LPS con nivel de protección II, compuesto por un captador aéreo de 12 m, doble bajante y placa sumergida de descarga, garantizando trayectorias de baja impedancia para disipar corrientes de hasta 150 kA. En paralelo, el SPT se configuró con ánodos de sacrificio de zinc conforme a ASTM B843, interconectados mediante un bonding bus bar central y barras colectoras secundarias distribuidas en tableros, válvulas, carcasas y tanques, asegurando la equipotencialidad de toda la estructura metálica del buque.

Desde la perspectiva de corrosión, se determinó que la fase inicial de operación exige densidades de corriente superiores para polarizar el casco recién pintado, mientras que, en la fase de mantenimiento, el deterioro del recubrimiento incrementa el área expuesta, pero reduce la densidad de corriente requerida por metro cuadrado. El dimensionamiento de los ánodos se ajustó a estos criterios, garantizando una vida útil de tres años entre varadas y validando su efectividad mediante la prueba de potencial con electrodo de cloruro de plata, donde los valores esperados de $-0,80$ V a $-1,05$ V confirman una protección adecuada contra la corrosión galvánica.

Los resultados obtenidos demuestran que el diseño propuesto:

- Reduce el índice de riesgo por descargas atmosféricas (Nr) a valores aceptables frente al límite normativo (Np), justificando la implementación obligatoria del LPS.
- Limita las tensiones de toque, paso y gradiente por debajo de 30 V en ambiente marino, garantizando la seguridad de las personas a bordo.

- Prolonga la vida útil del casco y de los sistemas eléctricos, al integrar medidas de control de corrosión con el SPT y la protección catódica.
- Protege los equipos críticos y salvaguarda la inversión económica total de la instalación eléctrica, estimada en 2,5 millones de dólares.

Las simulaciones realizadas en ETAP validaron integralmente el diseño del diagrama unifilar del sistema eléctrico de la embarcación, ratificando la correcta interacción entre los elementos de generación, protección, distribución y carga. Los análisis de flujo de carga y cortocircuito manifestaron que los niveles de tensión, corrientes y capacidades de los componentes se conservan dentro de rangos operativos apropiados, certificando un funcionamiento seguro, estable y selectivo bajo situaciones nominales y de falla, lo que respalda la confiabilidad del modelo desarrollado.

En conclusión, el proyecto logra integrar un enfoque normativo, técnico y práctico para transformar el estado inicial de alta vulnerabilidad de la embarcación hacia un sistema confiable, seguro y sostenible, capaz de operar en condiciones exigentes como las Islas Galápagos, donde la actividad atmosférica, la humedad y la salinidad imponen retos adicionales a la seguridad y la durabilidad estructural.

RECOMENDACIONES.

1. Implementación progresiva: se recomienda ejecutar la instalación del sistema de protección propuesto (SPT y LPS) de forma ordenada y supervisada por personal especializado en sistemas eléctricos navales, asegurando el cumplimiento de los procedimientos de soldadura, interconexión de barras colectoras y montaje de ánodos de sacrificio.
2. Mantenimiento preventivo: durante cada varada (aprox. cada 3 años), es indispensable verificar el estado de los ánodos de sacrificio y reemplazar aquellos que hayan perdido más del 50 % de su masa útil, garantizando así la continuidad de la protección catódica.
3. Prueba periódica con electrodo de cloruro de plata: se recomienda realizar mediciones semestrales de potencial casco-mar, para confirmar que los valores se mantienen en el rango $-0,80\text{ V}$ a $-1,05\text{ V}$ vs. Ag/AgCl. Estos registros deben formar parte de un historial de mantenimiento eléctrico y anticorrosivo de la embarcación.
4. Capacitación de la tripulación: parte del personal técnico debe ser entrenado en la detección temprana de fallas a tierra y en el uso de sistemas de protección eléctrica (IMD, DPS, bonding), de modo que puedan identificar desviaciones operativas y reportarlas de inmediato.
5. Sistema HRG (High Resistance Grounding): aunque no fue considerado para esta embarcación debido a su escala y nivel de tensión (127/220 V), se recomienda analizar su aplicabilidad en buques de mayor porte o instalaciones de media tensión. El HRG permite limitar la corriente de falla a tierra mediante resistencias de alto valor, reduciendo riesgos de daño y facilitando la continuidad de servicio.
6. Sistema ICCP (Impressed Current Cathodic Protection): como alternativa a los ánodos de sacrificio, el ICCP representa una solución avanzada que utiliza ánodos inertes y una fuente de CC controlada electrónicamente. Aunque su costo de instalación y mantenimiento es superior, ofrece ventajas en embarcaciones de gran eslora o que permanecen largos periodos en muelle, al mantener de forma automática el potencial de protección sin depender del consumo de ánodos.
7. Futuras ampliaciones del sistema: se sugiere considerar la integración de monitoreo remoto de parámetros eléctricos y de corrosión, lo que permitiría

anticipar fallas, optimizar el reemplazo de componentes y aumentar la seguridad operativa.

8. Se recomienda complementar y monitorear periódicamente las simulaciones en ETAP restableciendo los parámetros de operación del generador, protecciones y cargas reales de la embarcación, a fin de conservar una representación precisa del sistema ante posibles modificaciones o degradación de los diversos componentes. Esto permitirá robustecer la coordinación de protecciones, optimizar el desempeño energético y asegurar que el sistema eléctrico continúe trabajando de manera segura y acorde a los criterios establecidos en el diseño original.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] F. Caisaguano A. *et al.*, *Dirección del Parque Nacional Galápagos. Informe anual de ingreso de visitantes a las áreas protegidas de Galápagos del año 2023.*, DPNG. 2023. Accessed: Jun. 26, 2024. [Online]. Available: https://galapagos.gob.ec/wp-content/uploads/2024/03/INFORME_ANUAL_VISITANTES-2023_WEB-LQ.pdf
- [2] A. Amaguaya, JG. Castillo, C. Veintimilla, and N. Gómez, “Contribución Económica del turismo de Crucero Navegable en el Archipiélago de Galápagos y el país.” 2021. [Online]. Available: https://camaraindustria yproduccion-my.sharepoint.com/personal/camara_cip_org_ec/_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal%2Fcamara%5Fcip%5Forg%5Fec%2FDocuments%2FCIRCULARES%2Fthreat%5Fextracted%5FInfo
- [3] M. A. Zurita Álvarez, “Mapa isocerámico georreferenciado para la coordinación de protecciones frente a descargas atmosféricas,” Tesis de Grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2020. Accessed: Jun. 26, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18815>
- [4] D. M. Romps, J. T. Seeley, D. Vollaro, and J. Molinari, “Projected increase in lightning strikes in the united states due to global warming,” *Science (1979)*, vol. 346, no. 6211, pp. 851–854, Nov. 2014, doi: 10.1126/science.1259100.
- [5] “Diferencias entre barco, embarcación, yate y buque | MARINOS.” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://marinos.es/barco-embarcacion-yate-buque/>
- [6] R. M. Steward, “A project of Volunters in Ash Boatbuilding Manual . _I”.
- [7] Dave Gerr, “ELEMENTS OF BOAT STRENGTH.” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.gerrmarine.com/ELEMENTS_OF_BOAT_STRENGTH.html
- [8] Z. Wang, G. Li, X. Jin, and H. Li, “Modeling and Application of Magnetic Induction Wireless Power Transmission in Sea Water,” in *Proceedings - 2021 International Conference on Power System Technology: Carbon Neutrality and New Type of Power System, POWERCON 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 2172–2177. doi: 10.1109/POWERCON53785.2021.9697657.

- [9] Waterboards, “¿Qué es la conductividad eléctrica/salinidad?” Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130sp.pdf
- [10] A. Lopez, “Libro-de-Corrosion-Marina-Edicion-2025-WEB-6c17ve”.
- [11] V. B. García *et al.*, “Tesis defendida por Valdemar Belmonte García y aprobada por el siguiente Comité,” 2016.
- [12] S. Kasthala and R. Goru, “High Resistance Grounding Systems in MV Shipboard Power Systems,” in *2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation, SeFeT 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/SeFeT55524.2022.9909314.
- [13] Mohammed M. Islam, “Grounding, Insulation Monitoring Design, and Verification,” in *Shipboard Power Systems Design and Verification Fundamentals*, Wiley, 2018, pp. 216–241. doi: 10.1002/9781119084136.ch9.
- [14] “IEC 62305-1:2024 | IEC Webstore.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/27136>
- [15] “IEC 62305-2:2024 | IEC Webstore.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/28137>
- [16] “IEC 62305-3:2024 | IEC Webstore.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/33680>
- [17] “IEC 60479-1:2018 | IEC Webstore.” Accessed: Sep. 10, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62980>
- [18] ICONTEC, “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4552-1,” 2008.
- [19] “B843 Standard Specification for Magnesium Alloy Anodes for Cathodic Protection.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://store.astm.org/b0843-18e01.html>
- [20] P. Systems Engineering Committee of the IEEE Industry Applications Society, “IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991) IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.” [Online]. Available: <http://standards.ieee.org>

- [21] “IEEE Std 45”.
- [22] “ABYC E-11-2018 - AC & DC ELECTRICAL SYSTEMS ON BOATS.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.ansi.org/standards/abyc/ABYC112018>
- [23] “A-28 - Galvanic Isolators (Published July 2008).” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.ansi.org/standards/abyc/28>
- [24] “ABYC E-2-2019 - Cathodic Protection.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.ansi.org/standards/abyc/ABYC2019>
- [25] R. J. Camacho Delgado and E. F. Moreira Mite, “Diseño e implementación de instalación eléctrica, electromecánica y sistema de puesta a tierra para el Catamaran Ocean Spray,” Tesis de Grado, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2012. Accessed: Jun. 26, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/3279>
- [26] A. Lopez, “Marine Electricity HandBook Version Español 2024 WEB-1”.
- [27] “IEC 61643-11:2025 | IEC Webstore.” Accessed: Sep. 08, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/65314>
- [28] “FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD.”
- [29] M. Fan, J. Xia, X. Meng, and K. Zhang, “Single-Phase Grounding Fault Types Identification Based on Multi-Feature Transformation and Fusion,” *Sensors (Basel)*, vol. 22, no. 9, p. 3521, May 2022, doi: 10.3390/S22093521.
- [30] Iec, *INTERNATIONAL STANDARD NORME INTERNATIONALE Protection against lightning-Part 4: Electrical and electronic systems within structures Protection contre la foudre-Partie 4: Réseaux de puissance et de communication dans les structures* INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 2024.
- [31] “IEEE SA - IEEE 80-2000.” Accessed: Sep. 10, 2025. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/80/225/>
- [32] “El clima en Puerto Ayora, el tiempo por mes, temperatura promedio (Ecuador) - Weather Spark.” Accessed: Sep. 12, 2025. [Online]. Available:

<https://es.weatherspark.com/y/11615/Clima-promedio-en-Puerto-Ayora-Ecuador-durante-todo-el-a%C3%B1o>

- [33] “Lightning density maps for every country in the world | Vaisala.” Accessed: Sep. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.vaisala.com/en/blog/2021-04/lightning-density-maps-every-country-world?utm=>
- [34] “IEC 61557-8:2014 | IEC Webstore.” Accessed: Sep. 13, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/5582>
- [35] “IEC 60364-4-41:2005 | IEC Webstore.” Accessed: Sep. 08, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/1867>
- [36] “Schneider Electric_Acti-9-iPRF1-PRD1_A9L16482 T1”.
- [37] “FAILSAFE SELLSHEET C | Enhanced Reader.”
- [38] “Dry – ECUATRAN.” Accessed: Sep. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.ecuatran.com/producto/secos/>
- [39] “IM400-Vigilohm-controlador de aislamiento permanente-100-440 VCA IMD-IM400.”
- [40] “Protecting your ship’s propeller... | Althen Controls.” Accessed: Sep. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.althencontrols.com/projects/protecting-your-ships-propeller-shaft/>
- [41] “Propeller Shaft Earthing & Potential Monitoring INSTALLATION & MAINTENANCE Handbook & Operating Instructions Propeller Shaft Earthing Systems.”
- [42] “ABOUT US.” [Online]. Available: www.martyranodes.com
- [43] “Scania Motores | Scania México.” Accessed: Sep. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.scania.com/mx/es/home/products/power-solutions.html>
- [44] “C4.4 (50Hz) | Grupo Electrónico Diésel de 50 a 110kVA | Cat | Caterpillar.” Accessed: Sep. 11, 2025. [Online]. Available: https://www.cat.com/es_US/products/new/power-systems/electric-power/diesel-generator-sets/1000001234.html

ANEXOS.

ANEXO 1: FICHA TÉCNICA AISLADORA GALVÁNICO.

ProMariner®

ProSafe FS Series
FailSafe Technology with Peace Of Mind Dependability



The ProSafe FS Series of FailSafe 30 and 60 Amp Galvanic Isolators will interrupt galvanic current flow with other boats at a marina when installed on a boat which is connected to AC Shore Power. This technology maintains AC safety ground and solves the most common forms of corrosion and premature zinc loss within a boats bonding system. The ProSafe FS Series is UL Certified to meet the parameters of the ABYC A-28 recommendation with a July '08 release date.

ProSafe FS installs easily and does not require a dedicated monitor to verify the operational status of the galvanic isolator as required by non FailSafe Certified galvanic isolators. Both the ProSafe 30 and 60 Amp models are built on robust Flat Pack Semiconductor platforms, ensuring that in the event of a failure, the failure is safe by not compromising the ground continuity on-board when connected to AC Shore Power.

▶ **ABYC A-28 July '08 Compliant and Fail Safe Certified**

Certified by Underwriters Laboratories (UL). Insures shore power safety ground wire is maintained through the isolator.

▶ **Flat Pack High Power Semiconductors**

Robust high power diodes allow the FS Series to meet the new FailSafe criteria for conducting inrush currents of 3,000 and 5,000 amps (FS 30 and FS 60 respectively) for the required duration period.

▶ **Innovative Design**

The FS 60 will cool itself in the event it must conduct current insuring cooler operation in this mode.

▶ **Ignition Protected**

Meets ISO 8846 and either model can be mounted within an engine compartment.

▶ **Gold Plated Terminations**



For 30 Amp Shore Cord Applications



Patent Pending

For 1 50 Amp/2 30 Amp Shore Cord Applications

Specifications

model	part no.	shore cord inlet compatibility	ratings VAC / AMPS / Hz	max temp.	size L x W x H	weight
ProSafeFS30	22043	Single 15, 16, 20 or 30	120/240 VAC / 41A / 50 or 60 Hz	50° C	6.75" x 7" x 2.5"	3 lbs
ProSafeFS60	22074	Single 50 or Dual 15's, 16's, 20's or 30's	120/240 VAC / 82A / 50 or 60 Hz	50° C	7.25" x 6.5" x 3.75"	3.7 lbs

Professional Mariner, LLC / 200 International Drive, STE 195, Portsmouth NH 03801 / TEL: 603.433.4440 FAX: 603.433.4442 / www.promariner.com

Specifications subject to change without notice

ANEXO 2: FICHA TÉCNICA IMD.

Hoja de características del producto

Especificaciones



IM400 - Vigilohm - controlador de aislamiento permanente - 100-440 VCA

IMD-IM400

Principal

Gama	Vigilohm ((*))
Nombre abreviado del dispositivo	IM400
Tipo de producto o componente	Insulation monitoring device ((*))
Sistema de conexión a tierra	IT
Application	Aplicación marina Environment - standard application
Network size	Large or highly disturbed network
Tipo de circuito eléctrico	Circuito de alimentación Circuito de control
Type of network	1P + N 3P 3P + N
Idioma de usuario	Italiano Francés Alemán Chino Portugués Ruso Español Inglés

Complementario

tensión de red	0...480 V - CA en 45...440 Hz - tipo de cable: dispositivo conectado a fase) 0...830 V - CA en 45...440 Hz - tipo de cable: dispositivo conectado a neutral) 0...480 V - CC
fault event log	Registros de alarmas Sellado de tiempo 30 events
Modo de funcionamiento	Control Power
tipo de medición	Network insulation resistance ((*)), rango: 10 Ohm...10 MOhm, precisión: +/- 1 ° Earth leakage capacitance ((*)), rango: 0.01...500 µF, precisión: +/- 5 %
tiempo filtro configurable	4 s 40 s 400 s
tiempo respuesta	0.8 s 1/5th of set filtering time 8 s 1/5th of set filtering time 80 s 1/5th of set filtering time
Análisis de la calidad de la energía	Captura transitoria

Aviso Legal: Esta documentación no pretende sustituir ni debe utilizarse para determinar la adecuación o la fiabilidad de estos productos para aplicaciones específicas de los usuarios

señalizaciones en local	Verde Indicador luminoso:satisfactory insulation resistance ((*)) Blanco Indicador luminoso:below prevention threshold ((*)) Rojo Indicador luminoso:wiring or internal fault ((*)) Amarillo Indicador luminoso:defecto aislamiento Amarillo Parpadeo Indicador luminoso:comunicación
Regulación de sensibilidad	Pre-alarma, estado 1 1 kOhm...1 MOhm Alarma, estado 1 40 Ohm...500 kOhm
Rango de temporización	0...120 min para circuito de señalización 0...120 min para alarma
Tiempo de respuesta	<= 4 s
[Us] Tensión nominal de alimentación	100...440 V CA 50/60/400 Hz tolerancia: +/- 15% 100...440 V CC tolerancia: +/- 15%
Consumo de potencia en VA	25 VA
Consumo de energía en W	10 W
protección contra sobrecorrientes	2 A
función de prueba	Manual Auto test at start and every 5h
Communication of data	HMI: informes de las pruebas Transformador de resina fundida de tipo seco: informes de las pruebas
composición de contactos de señalización	2 C/A standard or fail-safe ((*))
tensión del circuito de señalización	250 V - CA en 3 A 48 V - CC en 1 A
Tipo de entrada	Contacto para injection inhibition ((*)) transformador de resina fundida de tipo seco Contacto para injection inhibition ((*)) Modbus
Communication port protocol	Modbus RS485
Tipo de pantalla	Pantalla LCD
Información mostrada	Resistance value Capacitance value Evolution of resistance in graph
Compatibilidad del producto	Automatic fault locator
Modo de montaje	Montaje enrasado
Soporte de montaje	Panel
posición de montaje	Horizontal
Conexiones - terminales	Bornero de tornillo extraíble0,2...2,5 mm²
Material	Termoplástico
Categoría de sobretensión	III 300 V II 600 V
peso del producto	0,645 kg
Dimensiones del recorte	112 x 148 mm
altura	123 mm
Anchura	159 mm
profundidad	90 mm

Entorno

Grado de protección IP	Caja, estado 1 IP20 Cara frontal, estado 1 IP54
------------------------	--

Características ambientales	Exposición al calor húmedo fuera de servicio conforming to IEC 60068-2-30 Exposición al calor húmedo en servicio conforming to IEC 60068-2-56 Niebla salina conforming to IEC 60068-2-52 1K22 conforming to IEC 60721-3 2K11 conforming to IEC 60721-3 3K24 conforming to IEC 60721-3 1M11 conforming to IEC 60721-3 2M4 conforming to IEC 60721-3 3M11 conforming to IEC 60721-3
Altitud de funcionamiento	<= 3000 m
Grado de contaminación	2
Humedad relativa	0...92 %
Tipo de instalación	Interior
normas	IEC 60364-4-41 IEC 61010-1 IEC 61557-8 UL 61010-1 IEC 61326-2-4 EN/IEC 61508 nivel SIL2
Certificaciones del producto	DNV RMRS CE ABS EAC CSA cULus UL EU-RO MR TA RCM
Marine certifications	TAE00001HB (expiry on 2029-09-22) MRE0000016 (expiry on 2027-07-05)
Temperatura ambiente del aire para el funcionamiento	-25...55 °C
Temperatura ambiente del aire para el almacenamiento	-40...70 °C

Unidades de embalaje

Tipo de unidad de paquete 1	PCE
Número de unidades en empaque	1
Paquete 1 Altura	14,000 cm
Paquete 1 Ancho	17,500 cm
Paquete 1 Longitud	21,200 cm
Peso del empaque (Lbs)	946,000 g
Tipo de unidad de paquete 2	S03
Número de unidades en el paquete 2	4
Paquete 2 Altura	30,000 cm
Paquete 2 Ancho	30,000 cm
Paquete 2 Longitud	40,000 cm
Paquete 2 Peso	4,458 kg
Tipo de unidad de paquete 3	P06
Número de unidades en el paquete 3	32
Paquete 3 Altura	75,000 cm
Paquete 3 Ancho	60,000 cm
Paquete 3 Longitud	80,000 cm

ANEXO 3: FICHA TÉCNICA DPS PRINCIPAL.

Ficha técnica del producto

Especificaciones



modular surge arrester; surge
arrester; surge; surge protection
device; lightning
arrester; lightning; type 1 surge
arrester; type 1 surge; type 1
arrester; residential; lightning
strikes; schneider spd; spd; din
rail; schneider surge arrester

A9L16482

Principal

gama de producto	IPRD-DC
Gama de productos	Acti 9
Nombre del Producto	Acti9 IPRE
Tipo de Producto o Componente	Limitador de sobretensiones con cartucho enchufable
Nombre Corto del Dispositivo	IPRD1 12.5
Aplicación del Dispositivo	Distribución Eléctrica Residencial y Comercial
normas	EN 61643-11:2012 IEC 61643-11:2011
etiquetas de calidad	CE EAC VDE
Número de Polos	3P + N
señalización remota	Donde
composición de contactos de señalización	1 SD (1 C/O)
tipo de limitador de sobretensiones	Red de distribución eléctrica
sistema de conexión a tierra	IT TN-S

Complementario

tipo y clase de limitador de sobretensiones	Tipo 1 + 2
tecnología de limitador de sobretensiones	MOV + GDT
[Ue] tensión asignada de empleo	230/400 V AC - tipo de cable: +/- 10 % en 50/60 Hz
intensidad de descarga nominal	20 kA
intensidad de salida máxima	50 kA
[Iimp] intensidad de impulso	Modo común, estado 1 50 kA N/PE Modo diferencial, estado 1 12,5 kA L/N
[Uc] tensión de funcionamiento máxima continua	Modo diferencial, estado 1 350 V L/N Modo común, estado 1 255 V N/PE
[Up] nivel de protección de tensión	<1,5 kV tipo 1 + 2
corriente residual	0,003 mA N/PE

Tasas arancelarias de enero del 2016

ANEXO 4: FICHA TÉCNICA DPS CASCADAS.

Ficha técnica del producto

Especificaciones



Protector de sobretensiones Acti9 iPRD40r 3P+N 40kA 350V

A9L40600

Principal

gama de producto	IPRD
Gama de productos	Acti 9
Nombre del Producto	Acti9 IPRD
Tipo de Producto o Componente	Limitador de sobretensiones con cartucho enchufable
Nombre Corto del Dispositivo	iPRD40
Aplicación del Dispositivo	Distribución Eléctrica Residencial y Comercial
normas	EN 61643-11:2012 IEC 61643-11:2011
Certificaciones de Producto	CE
etiquetas de calidad	KEMA-KEUR NF
Número de Polos	3P + N
señalización remota	Sin
tipo de limitador de sobretensiones	Red de distribución eléctrica
sistema de conexión a tierra	IT TN-S

Complementario

tipo y clase de limitador de sobretensiones	Tipo 2
tecnología de limitador de sobretensiones	MOV + GDT
[Ue] tensión asignada de empleo	230/400 V AC - tipo de cable: +/- 10 %) en 50/60 Hz
intensidad de descarga nominal	Modo común, estado 1 15 kA - tipo de cable: L/PE) Modo común, estado 1 15 kA - tipo de cable: N/PE) Modo diferencial, estado 1 15 kA - tipo de cable: L/N)
intensidad de salida máxima	Modo común, estado 1 40 kA L/PE Modo común, estado 1 40 kA N/PE Modo diferencial, estado 1 40 kA L/N
[Uc] tensión de funcionamiento máxima continua	Modo común, estado 1 260 V N/PE Modo común, estado 1 350 V L/PE Modo diferencial, estado 1 350 V L/N
[Up] nivel de protección de tensión	Modo común <1,4 kV tipo 2 N/PE Modo diferencial <1,4 kV tipo 2 L/N
[Ut] sobretensión temporal	337 V L/N 5 s mantenido 1200 V N/PE 200 ms modo de falla segura 442 V L/PE 5 s mantenido 1453 V L/PE 200 ms modo de falla segura

Tasas arancelarias de enero del 2016

9/09/2025

Life Is On | Schneider
Electric

1

Descargo de responsabilidad: Esta documentación no ha sido diseñada como reemplazo, ni se debe utilizar para determinar la idoneidad o la confiabilidad de estos productos para aplicaciones específicas de usuarios.

ANEXO 5: FICHA ÁNODOS DE SACRIFICIO.



SeaZinc

ÁNODOS DE SACRIFICIO
HOJA TÉCNICA

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Los ánodos de zinc SeaZinc de TECNOLOGÍA TOTAL se usan primordialmente para la prevención de la corrosión en agua de mar. También pueden usarse como ánodos pre-empacados en celdas de puesta a tierra en paneles de motores eléctricos, y a través de aisladores en tuberías para limitar altos voltajes peligrosos.

Los ánodos de zinc SeaZinc de TECNOLOGÍA TOTAL proveen la menor conducción de voltaje en comparación con los ánodos de aluminio y magnesio, por lo que no causan fácilmente sobreprotección que lleva al desprendimiento del recubrimiento y daño por hidrógeno de aceros de alta dureza.

Los ánodos de zinc de TECNOLOGÍA TOTAL se ajustan a ASTM B418 y a la especificación militar de los EE. UU, MIL-A-18001K, utilizando lingotes de alta pureza de zinc de 99.995% y otros materiales de alta calidad, procedimientos rígidos de inspección y producción, para asegurar que nuestros ánodos de zinc alcancen o superen los requerimientos de estándares internacionales.



APLICACIONES TÍPICAS

Los ánodos de zinc se utilizan como:

- Ánodos pre-empacados en celdas de puesta a tierra en paneles de motores eléctricos.
- Ánodos pre-empacados a través de aisladores en tuberías para limitar voltajes peligrosos.
- Ánodos de sacrificio para equipos y estructuras de acero y aluminio en contacto con agua de mar, como:
 - Cascos de barcos.
 - Tanques de lastre.
 - Intercambiadores de calor.
 - Condensadores.
 - Muelles.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Componente	ASTM B-418 tipo I	ASTM B-418 tipo II	MIL-A-18001K
Al%	0.1 – 0.5	0.005 máx.	0.1 – 0.5
Cd%	0.02 – 0.07	0.003 máx.	0.02 – 0.07
Fe%	0.005 máx.	0.0014 máx.	0.005
Pb%	0.006 máx.	0.003 máx.	0.006
Cu%	0.006 máx.	0.002 máx.	0.005
Zn%	La diferencia	La diferencia	La diferencia



SeaZinc

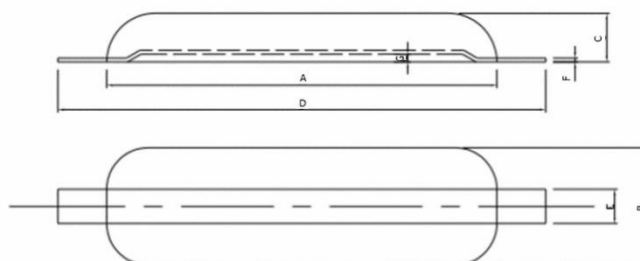
ÁNODOS DE SACRIFICIO
HOJA TÉCNICA

PROPIEDADES ELECTROQUÍMICAS

Propiedad	ASTM B-418 tipo I	ASTM B-418 tipo II
Voltaje abierto (-V)	1.05 min	1.10 min
Voltaje cerrado (-V)	1.00 min	1.05 min
Capacidad A.h/kg	780	780
Eficiencia %min	95%	90%

DIMENSIONES PARA ÁNODOS DE ZINC PARA CASCOS DE BUQUES (CB) (TIPO SOLDADURA CON INSERCIÓN INDIVIDUAL)

TIPO	Especificaciones (mm)	Inserto de acero (mm)				Peso Neto kg	Peso Bruto kg
	A x B x C	D	E	F	G		
CB-1	800 x 140 x 60	900	45	5-6	8-10	45.4	47.0
CB-2	800 x 140 x 50	900	45	5-6	6-8	37.4	39.0
CB-3	800 x 140 x 40	900	45	5-6	5-6	29.5	31.0
CB-4	600 x 120 x 50	700	40	5-6	6-8	24.0	25.0
CB-5	400 x 120 x 50	470	35	4-5	6-8	16.3	16.0
CB-6	500 x 100 x 40	580	40	4-5	5-6	12.7	13.6
CB-7	400 x 100 x 40	460	30	4-5	5-6	10.6	11.0
CB-8	300 x 100 x 40	360	30	3-4	5-6	7.20	7.50
CB-9	250 x 100 x 40	310	30	3-4	5-6	6.20	6.50
CB-10	180 x 70 x 40	230	25	3-4	5-6	3.30	3.50



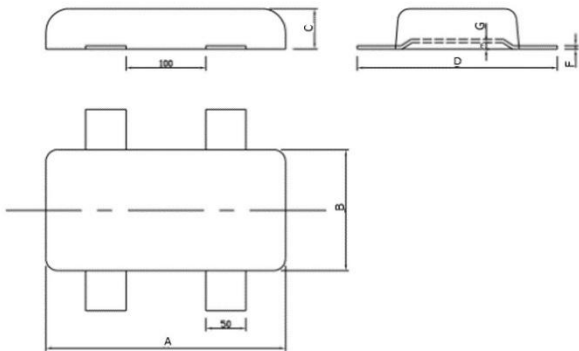


SeaZinc

ÁNODOS DE SACRIFICIO
HOJA TÉCNICA

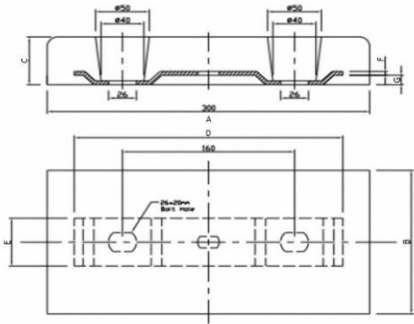
DIMENSIONES PARA ÁNODOS DE ZINC PARA CASCOS DE BUQUES (CBD) (TIPO SOLDADURA CON DOBLE INSERTO)

TIPO	Especificaciones (mm)	Inserto de acero (mm)				Peso Neto kg	Peso Bruto kg
	A x B x C	D	E	F	G		
CBD-1	300 x 150 x 50	360	30	4-5	5-6	13.70	14.50
CBD-2	300 x 150 x 40	360	30	4-5	5-6	10.70	11.50



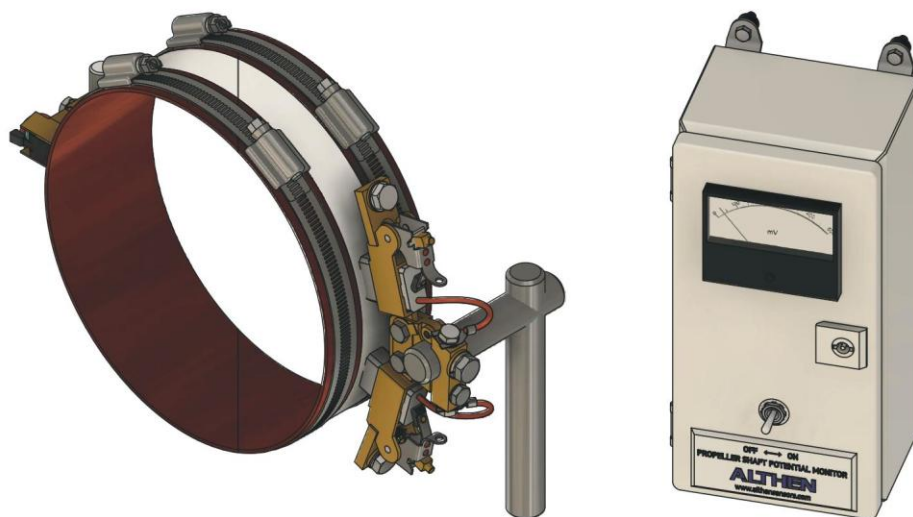
DIMENSIONES PARA ÁNODOS DE ZINC PARA CASCOS DE BUQUES (CBP) (TIPO PERNO)

TIPO	Especificaciones (mm)	Inserto de acero (mm)				Peso Neto kg	Peso Bruto Kg
	A x B x C	D	E	F	G		
CBT-1	300 x 150 x 50	250	50	3-4	8-10	11.6	12.0
CBT-2	300 x 150 x 40	250	50	3-4	8-10	8.60	9.00



ANEXO 6: FICHA TÉCNICA ANILLOS COLECTORES.

Handbook & Operating Instructions

ALTHEN
SENSORS & CONTROLS**Propeller Shaft Earthing & Potential Monitoring****INSTALLATION & MAINTENANCE**

08/02/21 | version 0001

■ 1. INTRODUCTION

On sea-going vessels and ships, the propeller blades and propeller shaft bearings are vulnerable to spark erosion as the turning propeller shaft becomes electrically insulated from the hull. This is even the case on vessels that are equipped with sacrificial anode systems. A propeller shaft earthing (PSE) system must be installed to avoid damage to the propulsion machinery which results in excessive maintenance costs.

In order to direct the electrical current that flows through the propeller shaft to the hull of the ship, a proper PSE system contains parts that have a very low electrical resistance. The main component of the Althen PSE system consists of a copper slipring with a solid silver inlay that is supplied with two stainless steel clamping bands including dedicated connectors. Furthermore, a brush holder is supplied which holds two silver/graphite brushes (80% Ag) that run over the silver track of the slipring. The brushholder is connected to the hull of the ship by means of an earthing cable. It has been proven that this set ensures optimal electrical continuity, which reduces total cost of ownership.

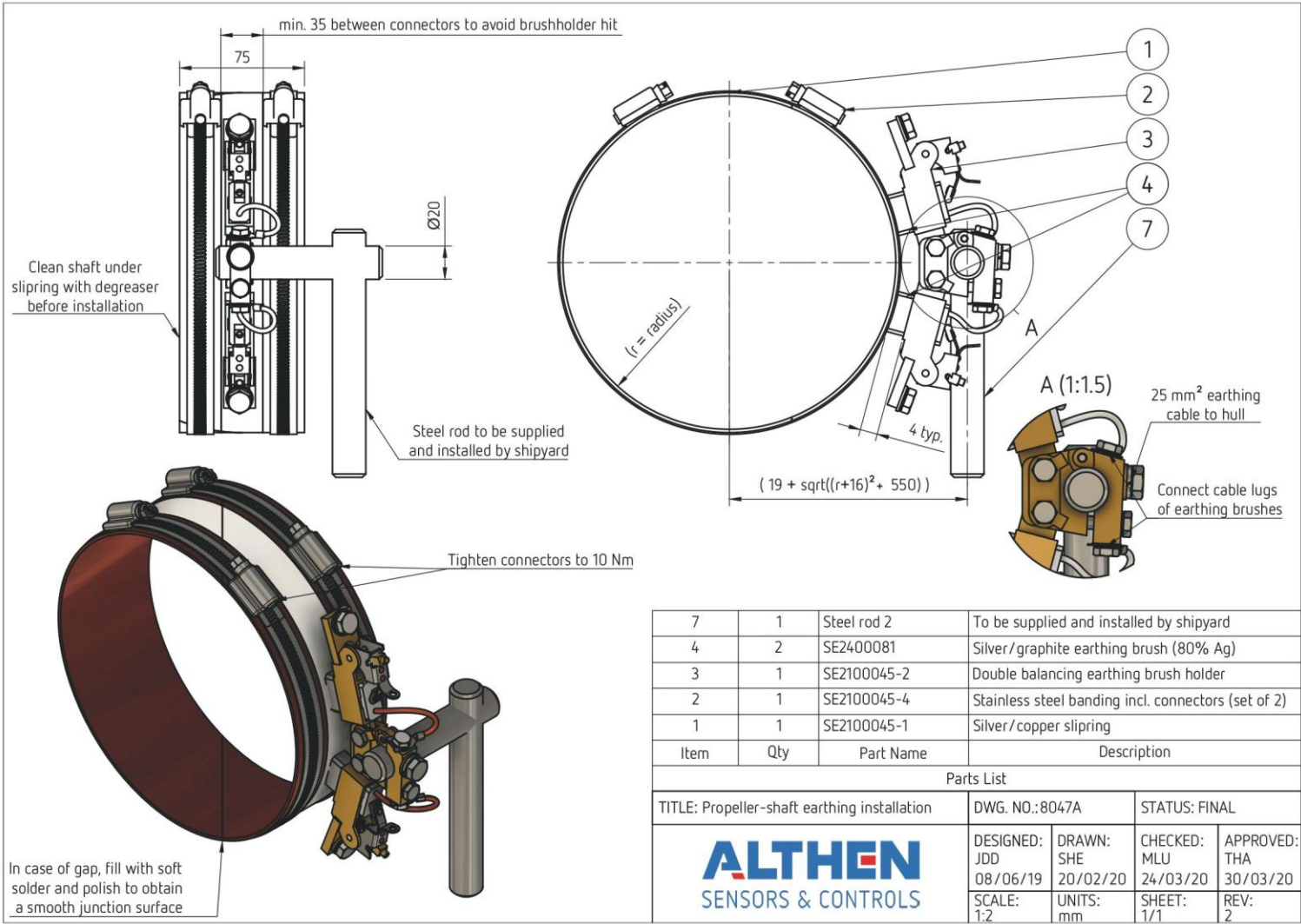
In addition to our PSE system, a monitoring set can be installed in the engine room to visualize the potential difference between the propeller shaft and the hull of the ship. This system contains an additional brushholder with a single brush that runs over the silver track of the slipring. This brushholder is insulated from the hull of the ship and connected to an analog mV-meter that indicates if the PSE system is working properly. The advantage of this monitoring system is that it operates independently without the need of power supply.

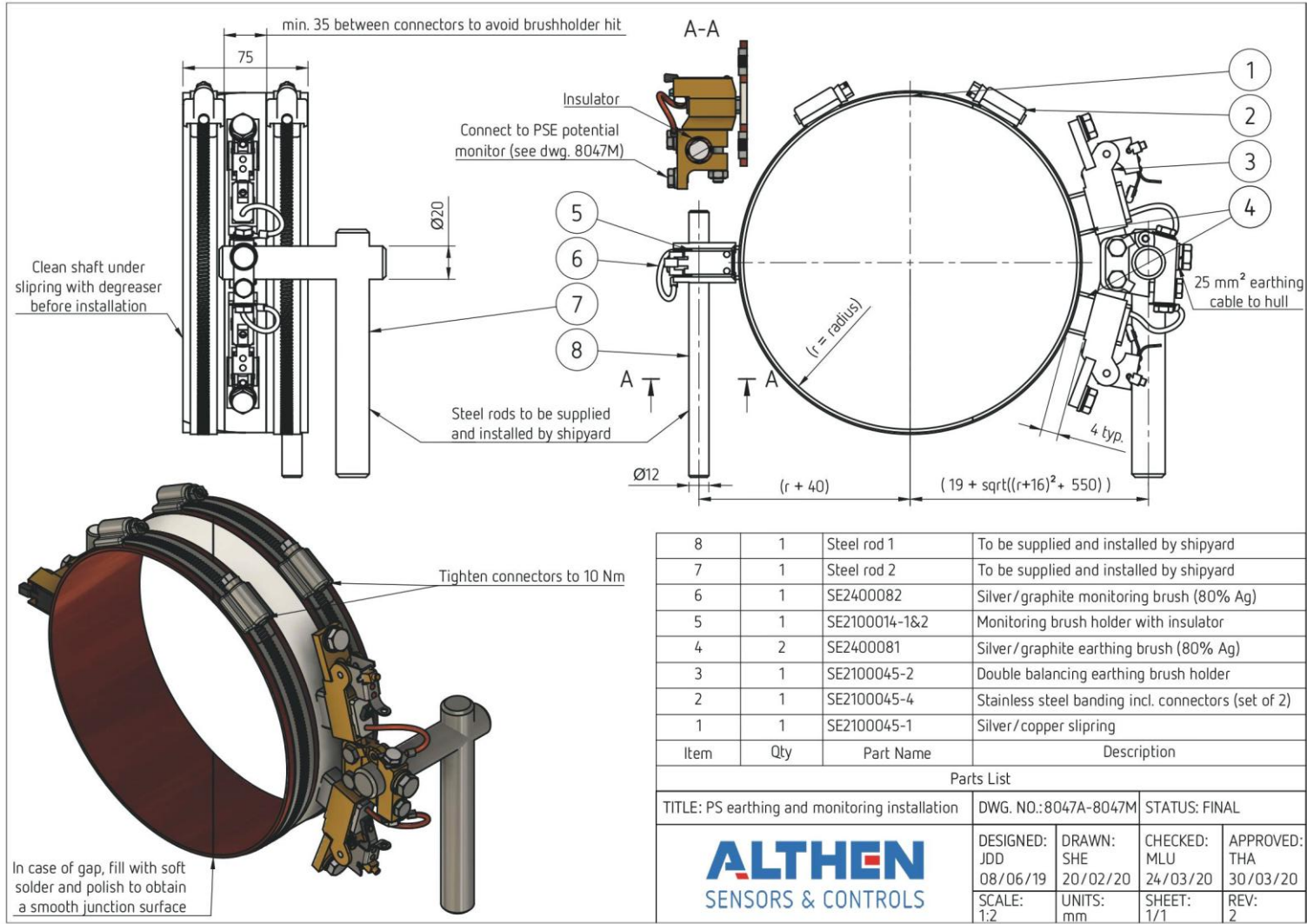
The analog mV-meter on the monitoring unit has a range of 0-500mV. When the shaft earthing set is working properly, the mV-meter should indicate a value below 50mV. Exceeding the 50mV means malfunction of the PSE system, which may be related to filthy or worn parts, or incorrect installation.

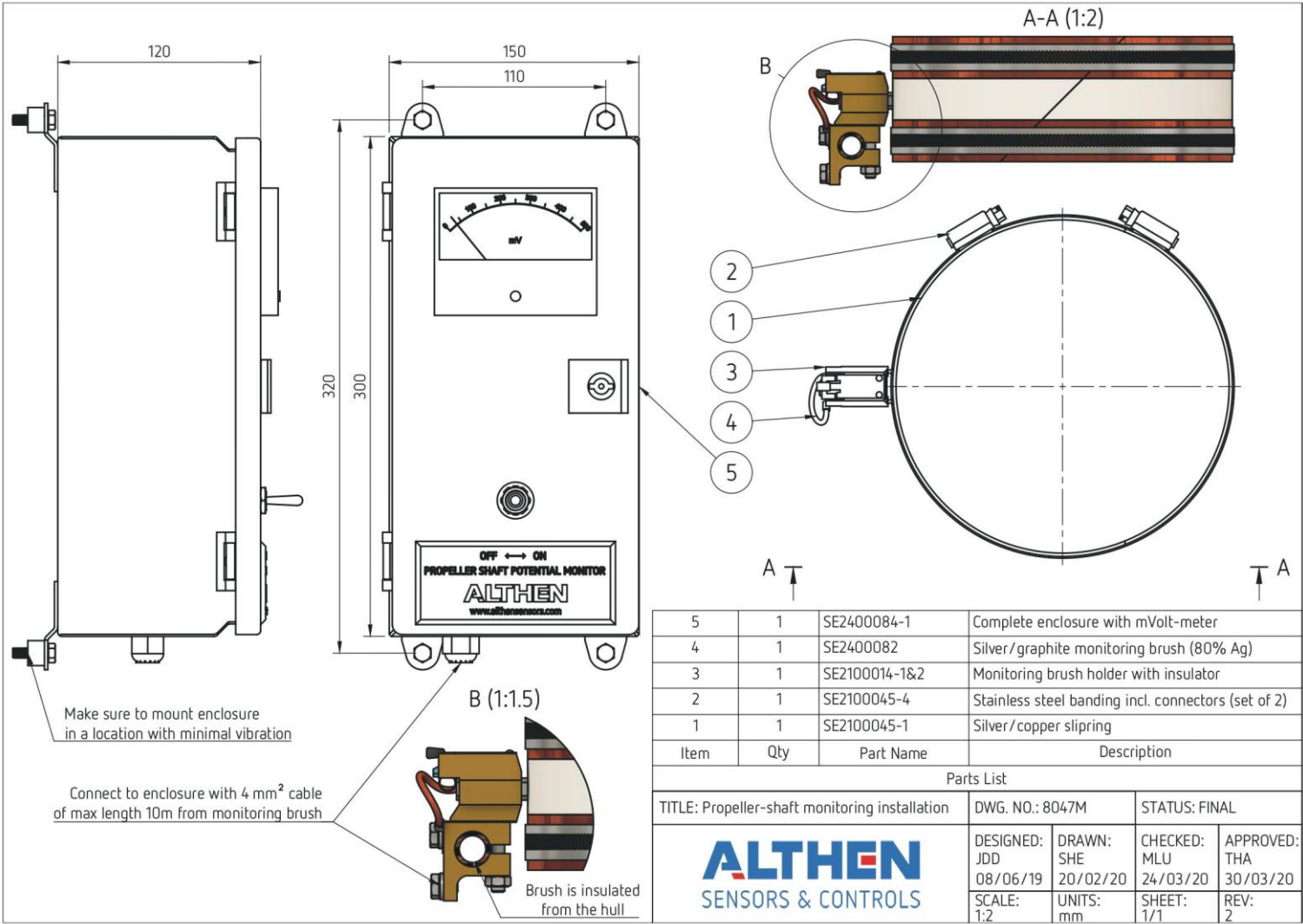
Additionally the monitoring set can be supplied with a 4-20mA converter that offers an additional alarm function. This function can be used to send a signal to the bridge when the potential difference becomes too high due to malfunction of the PSE system.

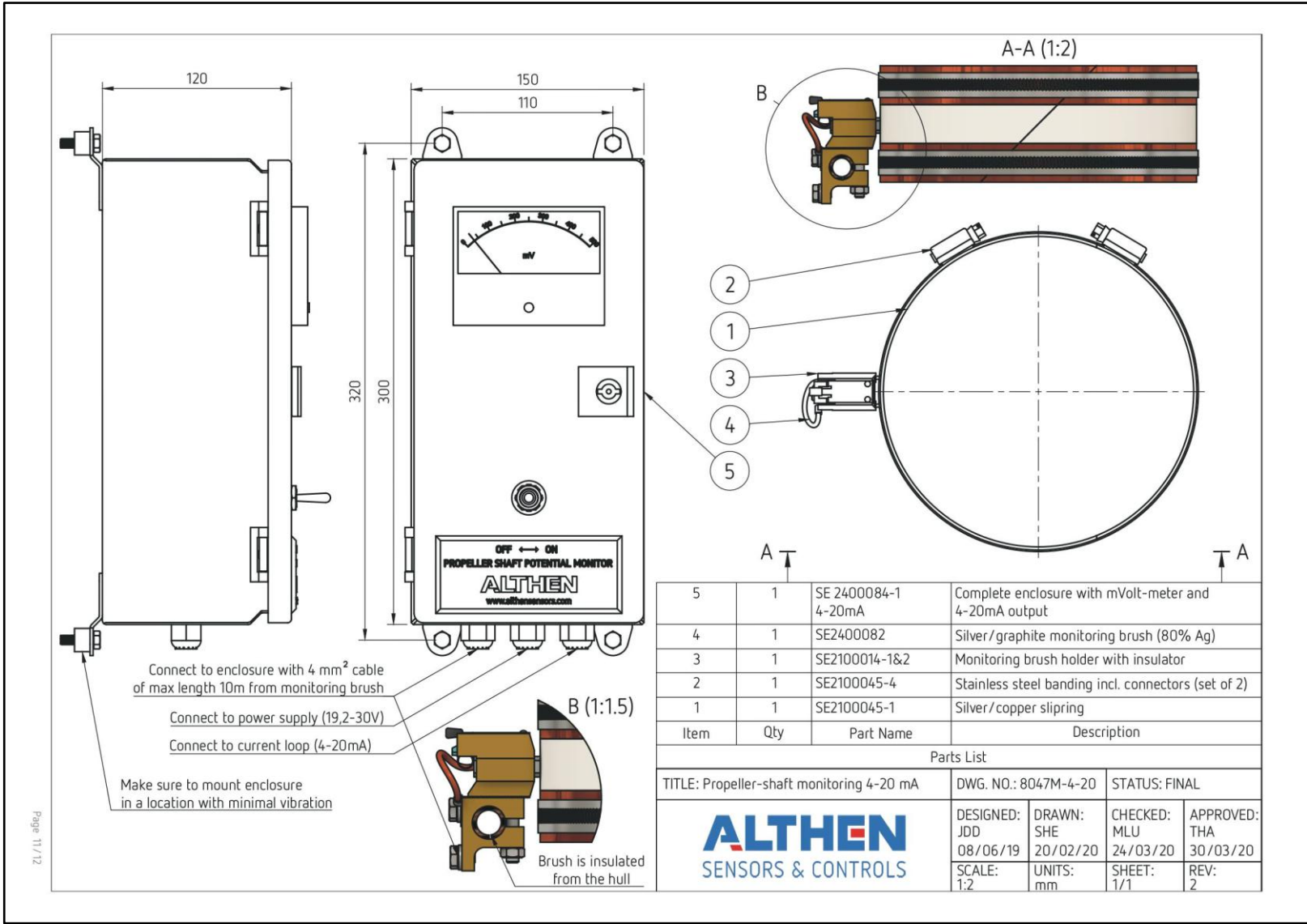
■ 2. SAFETY INSTRUCTIONS

The PSE systems should be installed when the propeller shaft is not turning. Both the slipring and clamping band have sharp edges that may cause injuries during installation. Therefore it is recommended to wear gloves and a protective overall during installation.

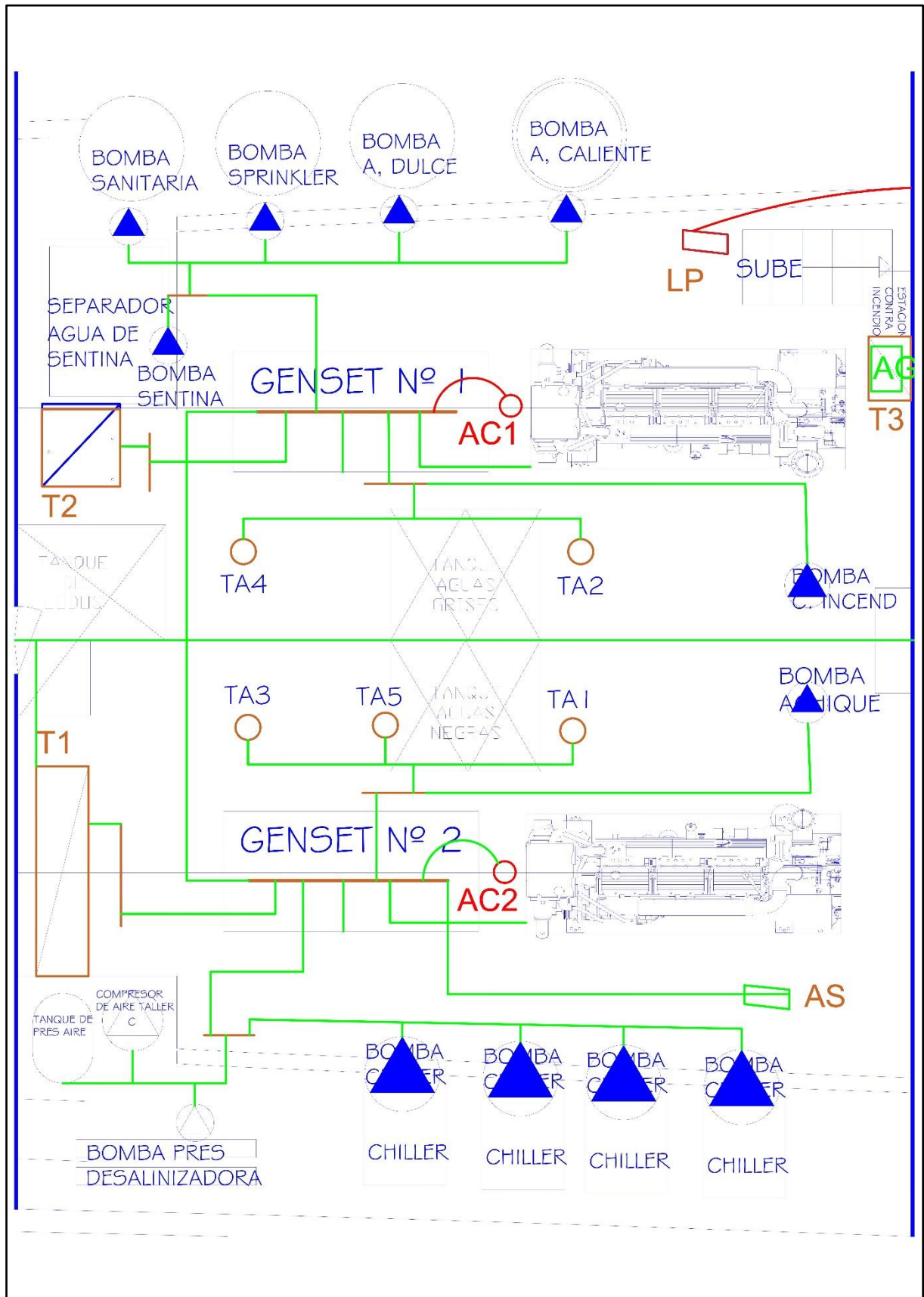


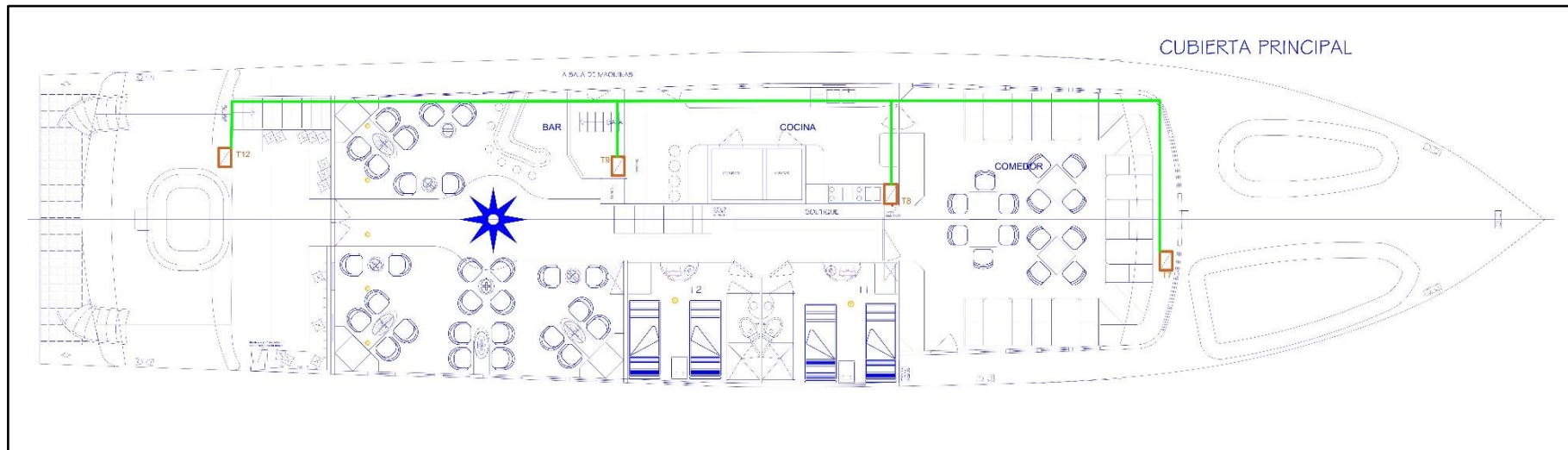


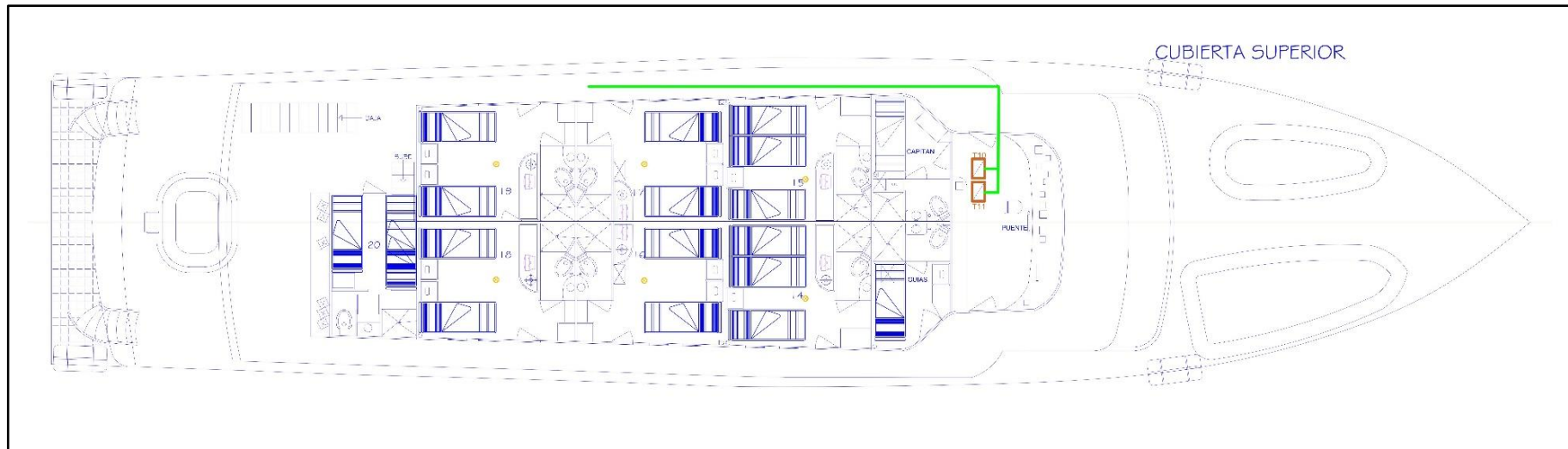




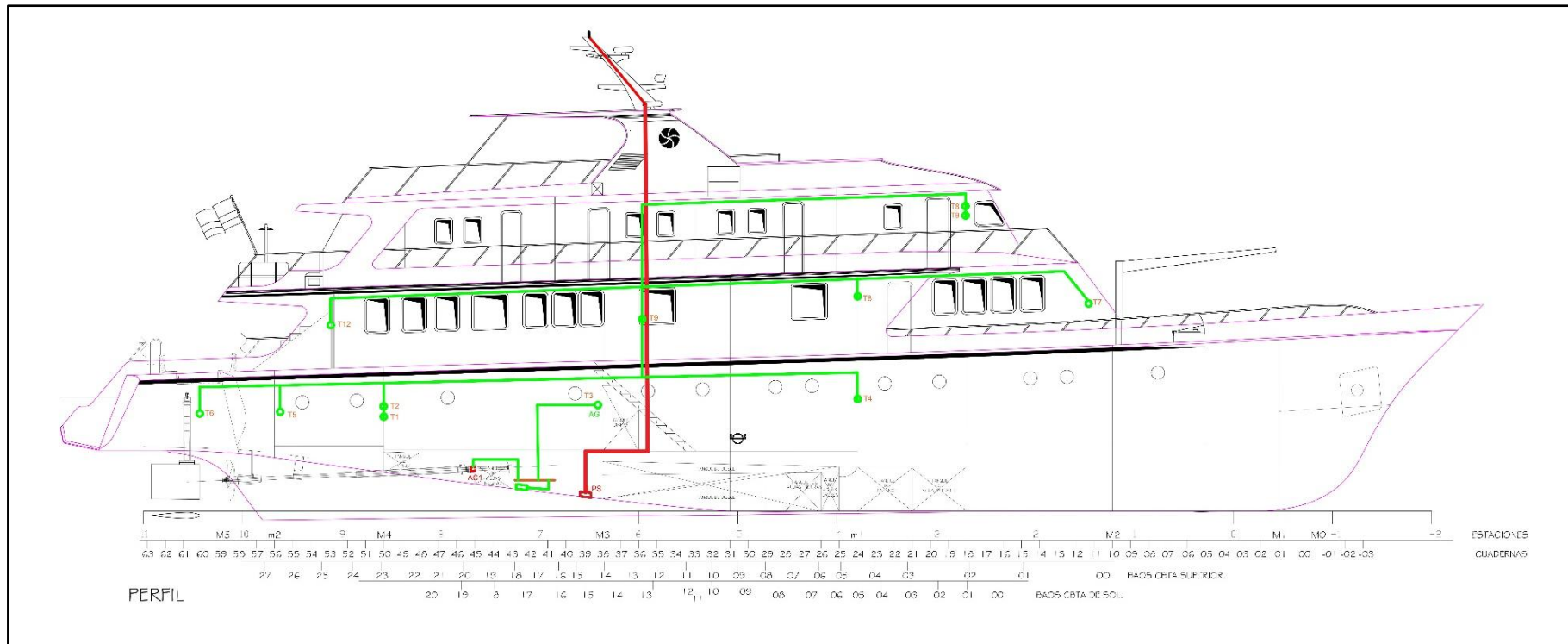
ANEXO 8: RUTA DE TIERRA SALA DE MÁQUINAS.



ANEXO 9: RUTA DE TIERRA CUBIERTA PRINCIPAL.

ANEXO 10: RUTA DE TIERRA CUBIERTA SUPERIOR.

ANEXO 11: RUTA DE TIERRA Y LPS EMBARCACIÓN COMPLETA.



**ANEXO 12: FICHA TÉCNICA DEL GENERADOR MAGNAPLUS®
MODELO 363PSL1607T60.**



**MARATHON ELECTRIC
SYNCHRONOUS AC GENERATOR
TYPICAL SUBMITTAL DATA**

Basic Model: 363CSL1607/363PSL1607

Date: 3/28/13

Kilowatt ratings at	1800 RPM	60 Hertz	12 Leads						
kW (kVA)	3 Phase	0.8 Power Factor	Dripproof or Open Enclosure						
	Class B	Class F			Class H				
	80° C ①	90° C ①	95° C ①	105° C †			125° C †		
Voltage*	Continuous	Lloyds	ABS	British Standard	105° C ①	130° C ①	British Standard	125° C ①	150° C ①
					Continuous	Standby		Continuous	Standby
240/480	110 (138)	115 (144)	115 (144)	125 (156)	125 (156)	135 (169)	135 (169)	135 (169)	150 (188)
230/460	110 (138)	115 (144)	115 (144)	125 (156)	125 (156)	135 (169)	135 (169)	135 (169)	150 (188)
220/440	105 (131)	110 (138)	110 (138)	115 (144)	115 (144)	130 (163)	130 (163)	130 (163)	140 (175)
208/416	100 (125)	105 (131)	105 (131)	110 (138)	110 (138)	125 (156)	125 (156)	125 (156)	135 (169)
190/380	90 (113)	95 (118)	95 (118)	100 (125)	100 (125)	115 (144)	115 (144)	115 (144)	125 (156)

① Rise by resistance method, Mil-Std-705, Method 680.1b.

† Rating per BS 5000.

Submittal Data: 480 Volts, 169 kVA, 1800 RPM, 60 Hz, 3 Phase

Mil-Std-705B			Mil-Std-705B		
Method	Description	Value	Method	Description	Value
301.1b	Insulation Resistance	> 1.5 Meg	505.3b	Overspeed	2250 RPM
302.1a	High Potential Test		507.1c	Phase Sequence CCW-ODE	ABC
	Main Stator	2000 Volts	601.4a	L-L Harmonic Maximum - Total	3.5%
	Main Rotor	1500 Volts		(Distortion Factor)	
	Exciter Stator	1500 Volts	601.4a	L-L Harmonic Maximum - Single	2.5%
	Exciter Rotor	1500 Volts	601.1c	Deviation Factor	7.0%
401.1a	Stator Resistance, Line to Line		---	TIF (1960 Weightings)	<50
	High Wye Connection	0.0692 Ohms	Additional Prototype Mil-Std Methods are Available on Request.		
	Rotor Resistance	1.365 Ohms			
	Exciter Stator	23.5 Ohms			
	Exciter Rotor	0.12 Ohms			
410.1a	No Load Exciter Field Amps at 480 Volts Line to Line	0.52 A DC	--	Generator Frame	360
420.1a	Short Circuit Ratio	0.485	--	Type	Ext. Voltage Regulated, Brushless
421.1a	Xd Synchronous Reactance	2.41 pu	--	Insulation	Class H
422.1a	X2 Negative Sequence Reactance	0.108 pu	--	Coupling - Single Bearing	Flexible
			--	Amortisseur Windings	Full
423.1a	X0 Zero Sequence Reactance	0.034 pu	--	Cooling Air Volume	700 CFM
425.1a	X'd Transient Reactance	0.152 pu	--	Exciter	Rotating
426.1a	X''d Subtransient Reactance	0.108 pu	--	Voltage Regulator	SE350
427.1a	T'd Transient Short Circuit Time Constant	0.06 sec.	--	Voltage Regulation	1%
428.1a	T''d Subtransient Short Circuit Time Constant	0.008 sec.			
430.1a	T'do Transient Open Circuit Time Constant	0.8 sec.			
432.1a	Ta Short Circuit Time Constant of Armature Winding	0.02 sec.			

* Voltage refers to wye (star) connection, unless otherwise specified.

www.marathonelectric.com

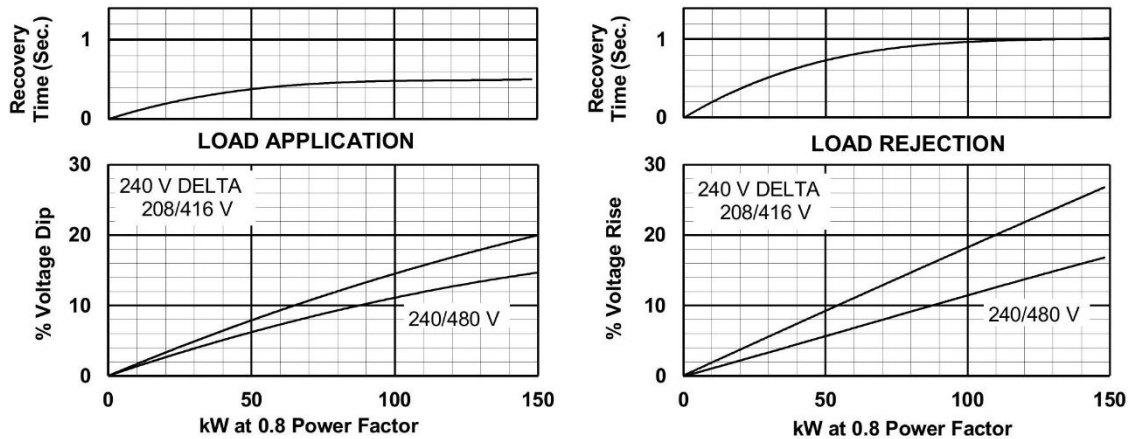


**MARATHON ELECTRIC
SYNCHRONOUS AC GENERATOR
TYPICAL DYNAMIC CHARACTERISTICS**

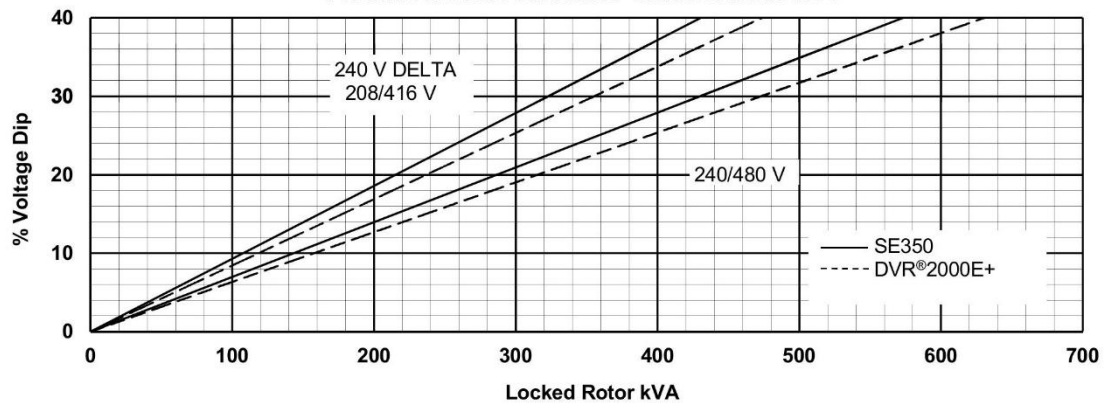
Basic Model: 363CSL1607/363PSL1607

Date: 3/28/13

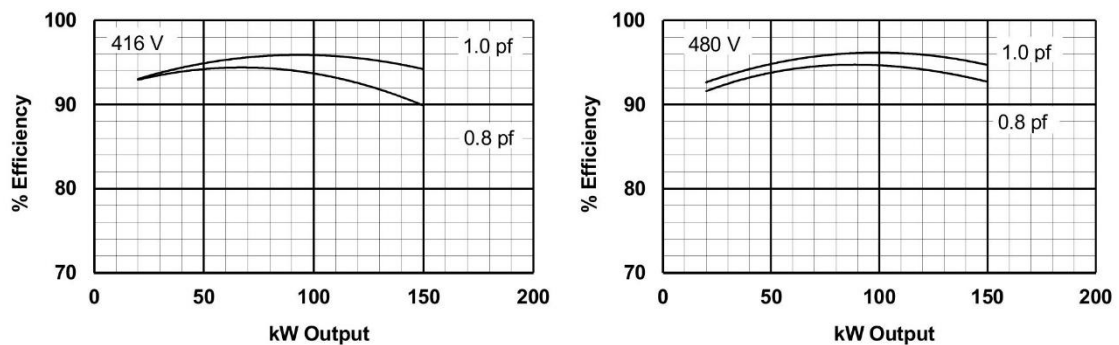
60 HERTZ



TYPICAL MOTOR STARTING CHARACTERISTICS



TYPICAL GENERATOR EFFICIENCY



Voltage refers to wye (star) connection, unless otherwise specified.

www.marathonelectric.com

ANEXO 13: ANÁLISIS DEL FLUJO DE CARGA EN ETAP.

Project:	ETAP	Page:	1
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: LF	Revision:	Base
Filename: TITULACION_JURADO		Config.:	Normal

Electrical Transient Analyzer Program

Load Flow Analysis

Loading Category (1): Design

Generation Category (1): Design

Load Diversity Factor: None

	Swing	V-Control	Load	Total
Number of Buses:	1	0	1	2

	XFMR2	XFMR3	Reactor	Line/Cable/ Busway	Impedance	Tie PD	Total
Number of Branches:	0	0	0	1	0	0	1

Method of Solution:	Adaptive Newton-Raphson Method
Maximum No. of Iteration:	99
Precision of Solution:	0.0001000
System Frequency:	60.00 Hz
Unit System:	English
Project Filename:	TITULACION_JURADO
Output Filename:	C:\ETAP 1901\TITULACION_JURADO\FLUJO-01.lfr

Project:	ETAP	Page:	2
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: LF	Revision:	Base
Filename:	TITULACION_JURADO	Config.:	Normal

Adjustments

<u>Tolerance</u>	<u>Apply Adjustments</u>	<u>Individual /Global</u>	<u>Percent</u>
Transformer Impedance:	Yes	Individual	
Reactor Impedance:	Yes	Individual	
Overload Heater Resistance:	No		
Transmission Line Length:	No		
Cable / Busway Length:	No		

<u>Temperature Correction</u>	<u>Apply Adjustments</u>	<u>Individual /Global</u>	<u>Degree C</u>
Transmission Line Resistance:	Yes	Individual	
Cable / Busway Resistance:	Yes	Individual	

Project:	ETAP	Page:	3
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: LF	Revision:	Base
Filename: TITULACION_JURADO		Config.:	Normal

Bus Input Data

Bus			Initial Voltage		Load							
ID	kV	Sub-sys	% Mag.	Ang.	Constant kVA		Constant Z		Constant I		Generic	
					MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
Barra Carga	0.208	1	100.0	0.0	0.073	0.046	0.018	0.011				
Barra Generador	0.208	1	100.0	0.0								
Total Number of Buses: 2					0.073	0.046	0.018	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000

Generation Bus				Voltage		Generation			Mvar Limits	
ID	kV	Type	Sub-sys	% Mag.	Angle	MW	Mvar	% PF	Max	Min
Barra Generador	0.208	Swing	1	100.0	0.0					
						0.000	0.000			

Project:	ETAP	Page:	4
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: LF	Revision:	Base
Filename:	TITULACION_JURADO	Config.:	Normal

Line/Cable/Busway Input Data

ohms or siemens/1000 ft per Conductor (Cable) or per Phase (Line/Busway)

Line/Cable/Busway			Length		#/Phase	T (°C)	R	X	Y
ID	Library	Size	Adj. (ft)	% Tol.					
Acometidas BT		300	820.2	0.0	1	75	0.021641	0.023774	0.0000000

Line / Cable / Busway resistances are listed at the specified temperatures.

Project:

Location:

Contract:

Engineer:

Filename:

ETAP

19.0.1C

Study Case: LF

TITULACION_JURADO

Page:

Date:

SN:

Revision:

Config.:

5

12-14-2025

Base

Normal

Branch Connections

CKT/Branch		Connected Bus ID		% Impedance, Pos. Seq., 100 MVA Base			
ID	Type	From Bus	To Bus	R	X	Z	Y
Acometidas BT	Line	Barra Generador	Barra Carga	4102.72	4507.21	6094.85	0.0000000

Project:

Location:

Contract:

Engineer:

Filename:

ETAP

19.0.1C

Study Case: LF

TITULACION_JURADO

Page:

Date:

SN:

Revision:

Config.:

6

12-14-2025

Base

Normal

LOAD FLOW REPORT

Bus		Voltage		Generation		Load		Load Flow				XFMR	
ID	kV	% Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	%PF	%Tap
Barra Carga	0.208	93.376	-1.1	0.000	0.000	0.089	0.055	Barra Generador	-0.089	-0.055	312.8	85.0	
* Barra Generador	0.208	100.000	0.0	0.095	0.061	0.000	0.000	Barra Carga	0.095	0.061	312.8	84.0	

* Indicates a voltage regulated bus (voltage controlled or swing type machine connected to it)

* Indicates a bus with a load mismatch of more than 0.1 MVA

Project:

Location:

Contract:

Engineer:

Filename:

ETAP

19.0.1C

Study Case: LF

TITULACION_JURADO

Page:

Date:

SN:

Revision:

Config.:

7

12-14-2025

Base

Normal

Bus Loading Summary Report

Bus			Directly Connected Load								Total Bus Load			
			Constant kVA		Constant Z		Constant I		Generic		MVA	% PF	Amp	Percent Loading
ID	kV	Rated Amp	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar				
Barra Carga	0.208		0.073	0.046	0.016	0.010					0.105	85.0	312.8	
Barra Generador	0.208										0.113	84.0	312.8	

* Indicates operating load of a bus exceeds the bus critical limit (100.0% of the Continuous Ampere rating).
Indicates operating load of a bus exceeds the bus marginal limit (95.0% of the Continuous Ampere rating).

Project:	ETAP	Page:	8
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: LF	Revision:	Base
Filename: TITULACION_JURADO		Config.:	Normal

Branch Losses Summary Report

Branch ID	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop
	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From	To	in Vmag
Acometidas BT	-0.089	-0.055	0.095	0.061	5.2	5.7	93.4	100.0	6.62
					5.2	5.7			

* This Transmission Line includes Series Capacitor.

Project:	ETAP	Page:	9
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: LF	Revision:	Base
Filename:	TITULACION_JURADO	Config.:	Normal

Alert Summary Report

	% Alert Settings	
	<u>Critical</u>	<u>Marginal</u>
<u>Loading</u>		
Bus	100.0	95.0
Cable / Busway	100.0	95.0
Reactor	100.0	95.0
Line	100.0	95.0
Transformer	100.0	95.0
Panel	100.0	95.0
Protective Device	100.0	95.0
Generator	100.0	95.0
Inverter/Charger	100.0	95.0
<u>Bus Voltage</u>		
OverVoltage	105.0	102.0
UnderVoltage	95.0	98.0
<u>Generator Excitation</u>		
OverExcited (Q Max.)	100.0	95.0
UnderExcited (Q Min.)	100.0	

Critical Report

Device ID	Type	Condition	Rating/Limit	Unit	Operating	% Operating	Phase Type
Barra Carga	Bus	Under Voltage	0.208	kV	0.194	93.4	3-Phase

Project:	ETAP	Page:	10
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: LF	Revision:	Base
Filename:	TITULACION_JURADO	Config.:	Normal

SUMMARY OF TOTAL GENERATION, LOADING & DEMAND

	MW	Mvar	MVA	% PF
Source (Swing Buses):	0.095	0.061	0.113	83.99 Lagging
Source (Non-Swing Buses):	0.000	0.000	0.000	
Total Demand:	0.095	0.061	0.113	83.99 Lagging
Total Motor Load:	0.073	0.046	0.086	85.00 Lagging
Total Static Load:	0.016	0.010	0.019	85.00 Lagging
Total Constant I Load:	0.000	0.000	0.000	
Total Generic Load:	0.000	0.000	0.000	
Apparent Losses:	0.005	0.006		
System Mismatch:	0.000	0.000		

Number of Iterations: 2

ANEXO 14: ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO EN ETAP.

Project:	ETAP	Page:	1
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: SC	Revision:	Base
Filename:	TITULACION_JURADO	Config.:	Normal

Electrical Transient Analyzer Program

Short-Circuit Analysis

ANSI Standard

3-Phase, LG, LL, & LLG Fault Currents

1/2 Cycle Network

	Swing	V-Control	Load	Total			
Number of Buses:	1	0	1	2			
	XFMR2	XFMR3	Reactor	Line/Cable/ Busway	Impedance	Tie PD	Total
Number of Branches:	0	0	0	1	0	0	1
	Synchronous Generator	Power Grid	Synchronous Motor	Induction Machines	Lumped Load	Total	
Number of Machines:	1	0	0	0	1	2	

System Frequency:	60.00
Unit System:	English
Project Filename:	TITULACION_JURADO
Output Filename:	C:\ETAP 1901\TITULACION_JURADO\ANALISIS_CORTOCIRCUITO.SA2S

Project:	ETAP	Page:	2
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: SC	Revision:	Base
Filename:	TITULACION_JURADO	Config.:	Normal

Adjustments

Tolerance	Apply Adjustments	Individual /Global	Percent
Transformer Impedance:	Yes	Individual	
Reactor Impedance:	Yes	Individual	
Overload Heater Resistance:	No		
Transmission Line Length:	No		
Cable / Busway Length:	No		

Temperature Correction	Apply Adjustments	Individual /Global	Degree C
Transmission Line Resistance:	Yes	Individual	
Cable / Busway Resistance:	Yes	Individual	

Project:	ETAP	Page:	3
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: SC	Revision:	Base
Filename:	TITULACION_JURADO	Config.:	Normal

Bus Input Data

Bus					Initial Voltage	
ID	Type	Nom. kV	Base kV	Sub-sys	%Mag.	Ang.
Barra Carga	Load	0.208	0.208	1	100.00	0.00
Barra Generador	SWNG	0.208	0.208	1	100.00	0.00

2 Buses Total

All voltages reported by ETAP are in % of bus Nominal kV.
Base kV values of buses are calculated and used internally by ETAP.

Project:	ETAP	Page:	4
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: SC	Revision:	Base
Filename:	TITULACION_JURADO	Config.:	Normal

Line/Cable/Busway Input Data

ohms or siemens per 1000 ft per Conductor (Cable) or per Phase (Line/Busway)												
Line/Cable/Busway			Length		#/Phase	T (°C)	R1	X1	Y1	R0	X0	Y0
ID	Library	Size	Adj. (ft)	% Tol.								
Acomctidus BT		300	820.2	0.0	1	75	0.0216408	0.0237744	0	0.0649224	0.071628	0

Line / Cable / Busway resistances are listed at the specified temperatures.

Project:	ETAP	Page:	5
Location:	19.0.1C	Date:	12-14-2025
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: SC	Revision:	Base
Filename:	TITULACION_JURADO	Config.:	Normal

Branch Connections

CKT/Branch		Connected Bus ID		% Impedance, Pos. Seq., 100 MVAh			
ID	Type	From Bus	To Bus	R	X	Z	Y
Acometidas BT	Line	Barra Generador	Barra Carga	4102.72	4507.21	6094.85	0.0000000

Project:ETAP

Location:19.0.1C

Contract:

Engineer:

Filename:TITULACION_JURADO

Page:6

Date:12-14-2025

SN:

Revision:Base

Config.:Normal

Study Case: SC

Synchronous Generator Input Data

Synchronous Generator		Rating			Positive Seq. Impedance					Grounding			Zero Seq. Impedance		
					% Xd''				% Xd'						
ID	Type	MVA	kV	RPM	X''/R	% R	Adj.	Tol.	% Xd'	Conn.	Type	Amp	X/R	% R0	% X0
Gncrador	Steam Turbo	0.169	0.208	1800	19.00	1.000	19.00	0.0	28.00	Wye	Solid		7.00	1.000	7.00

Total Connected Synchronous Generators (= 1): 0.169 MVA

Project:
Location:
Contract:
Engineer:
Filename: TITULACION_JURADO

ETAP
19.0.1C

Study Case: SC

Page: 8
Date: 12-14-2025
SN:
Revision: Base
Config.: Normal

SHORT- CIRCUIT REPORT

Fault at bus: Barra Generador

Prefault voltage = 0.208 kV
= 100.00 % of nominal bus kV (0.208 kV)
= 100.00 % of base kV (0.208 kV)

Contribution		3-Phase Fault		Line-To-Ground Fault					Positive & Zero Sequence Impedances Looking into "From Bus"			
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	kA Symm. rms	% Voltage at From Bus			kA Symm. rms		% Impedance on 100 MVA base			
				Va	Vb	Vc	Ia	I3I0	R1	X1	R0	X0
Barra Generador	Total	0.00	3.304	0.00	91.80	89.11	4.033	4.033	1.35E+003	8.29E+003	5.93E+002	4.15E+003
Barra Carga	Barra Generador	19.71	0.898	15.71	92.92	94.25	0.716	0.000	1.38E+004	2.77E+004		
Gncrador	Barra Generador	100.00	2.462	100.00	100.00	100.00	3.352	4.033	5.93E+002	1.13E+004	5.93E+002	4.15E+003

Indicates fault current contribution is from three-winding transformers
* Indicates a zero sequence fault current contribution (3I0) from a grounded Delta-Y transformer

Project:
Location:
Contract:
Engineer:
Filename: TITULACION_JURADO

ETAP
19.0.1C

Study Case: SC

Page: 9
Date: 12-14-2025
SN:
Revision: Base
Config.: Normal

Short-Circuit Summary Report

1/2 Cycle - 3-Phase, LG, LL, & LLG Fault Currents
Prefault Voltage = 100 % of the Bus Nominal Voltage

Bus		3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground		
ID	kV	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.
Barra Generador	0.208	0.531	-3.261	3.304	0.694	-3.973	4.033	2.873	0.525	2.921	2.502	2.925	3.849

All fault currents are symmetrical (1/2 Cycle network) values in rms kA.
* L,L,G fault current is the larger of the two faulted line currents.

Project:

ETAP

Page:

10

Location:

19.0.1C

Date:

12-14-2025

Contract:

SN:

Engineer:

Study Case: SC

Revision:

Base

Filename:

TITULACION_JURADO

Config.:

Normal

Sequence Impedance Summary Report

Bus		Positive Seq. Imp. (ohm)			Negative Seq. Imp. (ohm)			Zero Seq. Imp. (ohm)			Fault Zf (ohm)		
ID	kV	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	Impedance
Barra Generador	0.208	0.00584	0.03587	0.03634	0.00696	0.03418	0.03488	0.00256	0.01795	0.01813	0.00000	0.00000	0.00000