SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y PREDICCIÓN DEL NIVEL DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO EN EMBARCACIONES

MIGUEL ANTONIO ACUÑA DAVID

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTA DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS

ESCUELA DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INFORMATICA

BUCARAMANGA

2012

SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y PREDICCIÓN DEL NIVEL DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO EN EMBARCACIONES

MIGUEL ANTONIO ACUÑA DAVID

Trabajo de Grado para optar al título de

Ingeniero de Sistemas

DIRECTOR

Ph.D ARTURO PLATA - UIS

CO-DIRECTOR

Ing. DARIO RUEDAS - CIC

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTA DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS

ESCUELA DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INFORMATICA

BUCARAMANGA

2012

A mi madre querida, quien trabajo hasta el cansancio para poder brindarnos la oportunidad de asistir a una universidad.

A mis padrinos de bautizo, quienes me brindaron su apoyo incondicional y me enseñaron el valor del trabajo ganado con sudor y perseverancia.

A mi esposa Mónica y mis dos hijos, Alexandra y Mateo quienes han sido los pilares que sostienen mis metas del presente y del futuro.

A toda mi familia, que siempre ha creído en mis capacidades como persona y como profesional.

A todos mis amigos y conocidos que de una u otra forma influyeron y aun me ayudan a recorrer el camino de la vida.

AGRADECIMIENTOS

A la **Corporación para la investigación de la Corrosión**, por brindarme la oportunidad de crecer como persona y como profesional en un entorno de fraternidad y amistad.

Al Dr. **Jorge Hernando Panqueva**, por su paciencia y su constante preocupación por el desarrollo profesional y humano de la familia C.I.C.

Al Ph.D **Arturo Plata,** gran amigo incondicional y gestor del verdadero aprecio de la astronomía en nuestro país.

Al **Grupo de Desarrollo de Software C.I.C y la UEN TECNOLOGIAS de la CIC,** a todos los miembros que han estado y los que continúan hasta hoy, por su aporte en este proceso de crecimiento personal y profesional.

A la universidad Industrial de Santander por brindarme el espacio y el conocimiento necesario para alcanzar esta logro profesional.

CONTENIDO

INTRODUCCION 12

1. ESTADO DEL ARTE 15

1.1 LA CORROSIÓN GALVÁNICA EN LA NÁUTICA 15

1.2 MODELAMIENTO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO 16

1.2.1 Métodos de Diferencias Finitas (MDF) 18

1.2.2 Métodos de Elementos Finitos (MEF) 19

1.2.3 Métodos de Elementos de Contorno (MEC) 20

1.3 ESTADO DEL ARTE EN SIMULACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA 22

1.3.1 Diseños de Protección Catódica usando un Método de Ecuación Integral Numérica. 22

1.3.2 Determinación de las leyes de polarización por medidas integradas a herramientas numéricas 22

1.3.3 Algoritmos genéticos para problemas inversos de Protección Catódica. 23

2. ADAPTACIÓN DEL MODELO MATEMATICO 24

2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 24

2.1.1 Ecuación de Laplace 24

2.1.2 Condiciones de frontera 25

2.2 METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS 26

2.2.1 Discretización de los elementos finitos 27

2.2.2 Ecuaciones que rigen los elementos 29

2.2.3 Ensamble de todos los elementos 34

2.2.4 Solución de las ecuaciones resultantes 36

2.3 GAUSS SEIDEL 36

2.3.1 Relajación 39

2.4 MODELAMIENTO DE PÉRDIDA DE MASA EN UN ÁNODO CON BASE EN LA LEY DE FARADAY 40

2.5 MODELO DE DEGRADACIÓN DEL ÁNODO 42

2.5.1 Cálculo del volumen del ánodo 43
2.6 FACTORES ADICIONALES INCLUIDOS EN EL MODELO 43
2.6.1 Factor de área 43
2.6.2 Factor de geometría 45
3. DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE LA SOLUCION 47
3.1 ACOTAMIENTO DE LA REGIÓN 48
3.2 DIVISIÓN DE LA REGIÓN 49
3.3 UBICACIÓN DE LOS ANODOS 50
3.4 CREACIÓN DE LA MATRIZ DE CONEXIÓN 52
3.5 SOLUCION DE LA MATRIZ DE COEFICIENTES Y GRAFICAS DE RESULTADOS 52
4. CONSTRUCCION DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE 55
4.1 DEFINICION DE LOS CASOS DE USO 55
4.2 MODELO DE BASE DE DATOS 55
4.3 IMPLEMENTACION DE LA LIBRERÍA PARA PLANOS CAD 56
4.4 CONSTRUCCION DE LAS INTERFACES DE USUARIO 56
5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES 58
6. RECOMENDACIONES 63
REFERENCIAS 64
BIBLIOGRAFIA 68
ANEXOS 70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos finitos básicos 27
Figura 2. Discretización del área de solución 28
Figura 3. Discretización elemento triangular típico, los nodos están enumerados en sentido antihorario. 30
Figura 4. Representación esquemática del ánodo trapezoidal. 42
Figura 5. Zonas de la embarcación definidas en función de la eslora máxima. 44
Figura 6. Etapas del desarrollo de la solución 47
Figura 7. Plano CAD 48
Figura 8. Plano cargado en el Protek DS.....49
Figura 9. División del área de trabajo para el software Protek DS.....49
Figura 10. Subdivisión de elementos rectangulares a triangulares.....50
Figura 11. Distribución Automática 51
Figura 12. Distribución manual 51
Figura 13. Niveles de protección en el Protek DS.....53
Figura 14. Resultados Protek DS en distribución automática 54
Figura 15. Resultados Protek DS en distribución manual.....54
Figura 17. Formulario de ingreso de información.....57

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. CASOS DE USO 70

ANEXO B. BASE DE DATOS ……...73

ANEXO C. MANUAL DE USUARIO PROTEK DS ……74

RESUMEN

TITULO: SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y PREDICCIÓN DEL NIVEL DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ANODOS DE SACRIFICIO EN EMBARCACIONES [1]

AUTOR: MIGUEL ANTONIO ACUÑA DAVID [2]

PALABRAS CLAVE: Protección Catódica, Elementos Finitos, Corrosión, Ánodos de sacrificio, Gauss Seidel.

DESCRIPCIÓN: El sistema de protección catódica para una embarcación consiste en un número de ánodos de sacrificio, hechos de un metal fuertemente electronegativo tal como el zinc o aleaciones de aluminio. Además, las embarcaciones están expuestas a aguas de diferentes composiciones, cantidad de oxígeno, variaciones en la temperatura, en donde la conductividad y el contenido de sal son importantes porque ellos tienen una profunda influencia en la acción de las pilas de corrosión y distribución de la corriente. El diseño de un sistema de protección catódica se divide en dos etapas básica:

- Estimación de los requerimientos de corriente
- Determinación del tamaño, número y posición de los ánodos.

Se implemento una herramienta software compuesta de dos módulos; El módulo de ingreso de datos, conformado por varios formularios que alimentan una base de datos, la cual contiene información de los ánodos, los electrolitos, los usuarios, los costos y las embarcaciones. El segundo módulo se encarga de calcular la distribución óptima, para esto seleccionamos información a través de la interfaz gráfica del software en las pestañas de selección y posteriormente ejecutamos la simulación en las pestañas de diseño.

El software visualiza un plano de la embarcación, luego se definen: el medio, el tipo de ánodo, y el tipo de recubrimiento con el fin de calcular los requerimientos de corriente y posteriormente establecer el número de ánodos necesarios para proteger el área estimada del plano; El método utilizado para solucionar esta problemática es un análisis por elementos finitos aplicado sobre el área húmeda de la embarcación y en donde se pueden ubicar los ánodos, para la solución de estos elementos se aplican el método numérico de gauss Seidel. Los resultados obtenidos están representados gráficamente por áreas de colores sobre la región de estudio que corresponden al nivel de potencial de protección catódica.

---

[1] Proyecto de Grado: Ingeniero de Sistemas

[2] Facultad de Ingeniería Fisico-mecanicas. Escuela de Ingeniería Sistemas e Informática
Director: Ph.D Arturo Plata Codirector: Ing. Darío Ruedas

SUMMARY

TITLE: SOFTWARE SIMULATION AND PREDICTION OF LEVEL OF CATHODIC PROTECTION SACRIFICIAL ANODES VESSELS [1]

AUTHOR: MIGUEL ANTONIO ACUÑA DAVID [2]

KEYWORDS: Cathodic protection, Finite element, Corrosion, Sacrifice anodes, Gauss Seidel

DESCRIPTION: Cathodic protection system for ships consists in a number of sacrifice anodes; typically made of a highly electronegative metal such as zinc or aluminum alloys. In addition, the boats are exposed to different water compositions, oxygen, temperature variations, where conductivity and salt content are important because they have a deep influence in the action of the corrosion cell, and current distribution. Design a cathodic protection system is divided into two basic steps:

- Power requirements estimation
- Determining the size, number and position of the anodes.

The software tool is composed by two modules; the data [entry] module is made up of some forms that feed a database. This contains information of the anodes, electrolytes, users, costs and boats. The second module is responsible for calculating the optimal allocation, for this job, we need to select information through a graphical interface in the software, after choose the data from the respective tab, and then run the simulation in the design tab.

This software load a visualization from the boat plane, then define the environment, anode type, and type of coating to calculate the current requirements and then set the number of anodes needed to protect the estimated area. The implemented method to solve this problem is an analysis finite element applied to the wet area of the boat, where you can locate the anodes. To solve the finite elements method, is applied the Gauss Seidel numerical method. The results are graphically represented by colored areas on the region under study, and the level correspondence of cathodic protection potential.

---

[1] Work Degree: Systems Engineer

[2] Faculty of Phyisicomechanical Engineering. Systems and Informatics School.
Director: Ph.D Arturo Plata Codirector: Ing. Darío Ruedas

INTRODUCCIÓN

Las empresas nacionales que prestan los servicios de diseño e instalación de sistemas de protección catódica para el control de la corrosión en vehículos marinos, carecen de herramientas científicas y técnicas para ejecutar estas actividades de forma más eficiente, debido a la escasa investigación que se ha realizado y a la poca divulgación de información sobre el tema.

Una técnica utilizada para predecir los niveles de protección de los sistemas de protección catódica hace referencia a los modelos computarizados que pueden simular el comportamiento de la protección ante la influencia de las variables operacionales y ambientales y, con base en esta información, los operarios seleccionan la disposición y localización de los ánodos sobre el casco de la embarcación.

Dados los altos costos que suelen presentarse por problemas de corrosión en la industria marítima y en la industria en general, se ha llegado a la conclusión de que la instalación de materiales resistentes a la corrosión y los sistemas de protección catódica pueden alcanzar el 3% de los costos en la fabricación de una nueva embarcación [49].

A nivel local, no existen herramientas software aplicadas al diseño y simulación de estos sistemas, de tal suerte que gran parte de las decisiones se toman empíricamente, debido principalmente al poco conocimiento y desarrollo logrado en el país y casi hasta una dependencia tecnológica sobre el comportamiento y desempeño de los sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio en embarcaciones que operan zonas tropicales. Lo anterior, se traduce en un dimensionamiento exagerado de los sistemas de protección, una inadecuada distribución de los controles de corrosión sobre la superficie metálica de los buques y sobre-costos asociados a mayores cantidades de materiales necesarios,

mano de obra y un mayor peso de las embarcaciones que ocasiona un aumento en el consumo de combustible.

Actualmente, los diseños se elaboran en hojas de cálculo y software con alcance limitado, lo cual genera la necesidad de desarrollar una herramienta en la que se agrupen los conocimientos teóricos y operativos y los históricos de la instalación.

Por lo anteriormente expuesto, el desarrollo de una herramienta computacional que permita predecir y simular el nivel de protección contra la corrosión de sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio con aplicación a embarcaciones marítimas, es una oportunidad para fortalecer las capacidades nacionales de investigación y conocimiento científico.

El desarrollo de una solución a esta problemática se describe en los capítulos siguientes como sigue:

- Capitulo 1. Estado del arte
- Capitulo 2. Adaptación del modelo matemático
- Capitulo 3. Desarrollo e implementación de la solución
- Capitulo 4. Construcción de la herramienta software
- Capitulo 5. Resultados y conclusiones

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 LA CORROSIÓN GALVÁNICA EN LA NÁUTICA

La corrosión electroquímica es aquella que tiene lugar en los metales cuando están en contacto entre ellos o unidos por medio de un conductor de corriente, llamado electrolito.

Los metales de los barcos o de las instalaciones portuarias desarrollan este fenómeno por el simple hecho de estar sumergidas en el agua. La diferencia de potencial existente entre los distintos metales o en regiones diferentes del mismo metal hace que, inevitablemente, uno de ellos actúe como ánodo. Cuanto más bajo sea el potencial de un metal, más rápido será corroído o disuelto y, al mismo tiempo, cuanto mayor sea la diferencia de potencial existente entre dos metales, mayor será la corrosión galvánica producida entre ellos, resultando siempre perjudicado el metal de menor potencial.

La primera línea de defensa contra la corrosión en estructuras marinas son principalmente los sistemas de recubrimientos. Los sistemas de protección catódica son usados típicamente como la segunda línea de defensa contra los daños causados por la corrosión. Aún cuando la estructura se protege por un buen recubrimiento dieléctrico, los ánodos de sacrifico juegan un papel importante. Los sistemas de recubrimientos no son perfectos, y si el recubrimiento presenta defectos, áreas de metal desnudo de la estructura quedaran expuestas al electrolito y posteriormente serán agresivamente atacadas y corroídas. Los daños en el recubrimiento son eventos progresivos y un gran número de pequeños defectos pueden contribuir a un daño significativo. La instalación de un sistema de protección catódica ayuda a prevenir el daño continuo de las áreas desnudas y minimiza el deterioro del recubrimiento.

El empleo de ánodos de sacrificio, generalmente de zinc, es una práctica habitual en la construcción y mantenimiento de embarcaciones náuticas. Dicha corrosión afecta al casco, los apéndices, motores y conducciones metálicas, incluso a aquellas partes que están en el interior de la embarcación.

Es difícil predecir con precisión la corriente eléctrica necesaria o el número y distribución de los ánodos, en los sistemas de PC y por lo tanto el nivel de protección dado por éstos a las estructuras a través del tiempo, ya que hay un gran número de factores que influyen en la determinación de la densidad de corriente.

1.2 MODELAMIENTO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO

En la búsqueda de una descripción cualitativa de un determinado fenómeno físico, por lo general se plantea un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales, validas para determinada región (o dominio), y se imponen sobre dicho sistema condiciones de frontera e iniciales apropiadas. Cuando el modelo matemático está completo es donde aparece la mayor dificultad, dado que solamente la forma más simple de ecuaciones, con fronteras geométricamente triviales es capaz de ser resuelta en forma exacta con los métodos matemáticos disponibles [6].

Con el fin de evitar tales dificultades y lograr resolver el problema con la ayuda de computadoras, es necesario presentar el problema de una manera puramente algebraica.

Mediante el proceso de discretización, el conjunto infinito de números que representan la función o funciones incógnitas en el continuo es reemplazado por

un número finito de parámetros incógnita, este proceso requiere alguna forma de aproximación.

Se puede encontrar gran variedad de modelos relacionados con el cálculo de masa y distribución óptima de ánodos de sacrificio en estructuras marinas [3, 4], diferenciados entre sí por los factores que involucran y la interrelación entre éstos. Los factores que se han tenido como los más influyentes en los modelos encontrados en la literatura son:

- Área a proteger.
- Eficiencia del recubrimiento.
- Ubicación de los ánodos en láminas planas.
- Tiempo de protección.
- Tipo de material a proteger
- Masa anódica total.

En los trabajos más recientes relacionados con el modelamiento de sistemas de PC, se ha hecho énfasis en el método de aproximación de la solución de los modelos planteados y la exactitud de la solución que proveen, y al parecer se ha olvidado la validación y conciliación de los resultados de dichos modelos con datos de monitoreo de estructuras reales. Esto probablemente se deba a la dificultad de medir en ambientes reales variables tales como el potencial en un punto de la estructura en un momento dado y la corriente drenada en determinado momento por un ánodo, así como la evolución de estas variables a través del tiempo.

Los principales métodos de aproximación de soluciones usados para este tipo de problemas son:

- Métodos de Diferencias Finitas (MDF)
- Métodos de Elementos Finitos (MEF)
- Métodos de Elementos de Contorno (MEC)

A continuación se describirán brevemente algunos de los principales fundamentos de estos métodos.

1.2.1 Métodos de Diferencias Finitas (MDF)

Específicamente para los problemas relacionados con protección catódica Flek R. N. [8], Sale [9], Strommen [10], Doig et al. [12] publicaron a finales de los sesentas los primeros trabajos donde se aplican métodos de diferencias finitas para la aproximación de este tipo de problemas. Estos métodos requieren la discretización de la estructura a estudiar y su entorno, por medio de una grilla. La solución numérica es encontrada en los puntos de intersección, nodos, de la grilla. La exactitud de los resultados depende del número de ánodos de la misma.

Aunque los métodos de diferencias finitas, en la mayoría de los casos, proveen resultados con buena precisión, tienen desventajas. Algunas de ellas son:

- Complejidad del modelamiento de geometrías complejas
- Dificultad en la formulación de un ensamblaje sistemático de las ecuaciones resultantes.
- Dificultad de la programación de algoritmos que funcionen para diversas geometrías.
- Complejidad en el modelamiento de sistemas en 3 dimensiones.

Estos métodos se basan en la aproximación de derivadas mediante diferencias finitas. A continuación se muestran algunas aproximaciones para una función del tipo $\phi(x, y)$.

- Diferencias hacia adelante (forward differences), tienen un orden de error de $O(\Delta x)$

Las aproximaciones para las derivadas de primer orden son:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \approx \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta x} \text{ y } \frac{\partial \phi}{\partial y} \approx \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}}{\Delta y}$$

- Diferencias hacia atrás (backward differences) tienen un orden de error de $O(\Delta x)$

Las aproximaciones para las derivadas de primer orden son:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \approx \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i+1,j}}{\Delta x} \text{ y } \frac{\partial \phi}{\partial y} \approx \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i,j+1}}{\Delta y}$$

- Diferencias centrales (central differences) son una mejor aproximación que la lograda con las aproximaciones anteriores, tienen un orden de error de $O(\Delta x^2)$

Las aproximaciones para las derivadas de primer orden son:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \approx \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}}{2\Delta x} \text{ y } \frac{\partial \phi}{\partial x} \approx \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}}{2\Delta y}$$

Las aproximaciones para las derivadas de segundo orden son:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \approx \frac{\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}}{2\Delta x^2} \text{ y } \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \approx \frac{\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}}{2\Delta y^2}$$

1.2.2 Métodos de Elementos Finitos (MEF)

Se empezaron a emplear en la década de los setenta para la aproximación de la solución de modelos de sistemas de PC [11, 13, 15, 16, 20, 30]. Así como para el método de diferencias finitas, el sistema a ser analizado debe ser discretizado con una grilla, pero para este tipo de métodos, la grilla se divide en pequeños elementos, cada uno de los cuales tiene geometría simple. Para cada elemento se

obtiene un conjunto de ecuaciones y el sistema final de ecuaciones se obtiene ensamblando todas las ecuaciones resultantes de cada elemento.

Si en las diferencias finitas se reemplazan las derivadas por cocientes en diferencias, en los elementos finitos (MEF) el factor esencial es que la integral de una función medible se puede escribir como suma de integrales en dominios disjuntos cuya unión es el dominio original, esto permite hacer un análisis local del problema y si los dominios son suficientemente pequeños, los polinomios permiten una buena representación del comportamiento de la solución.

El método de los elementos finitos es una técnica general para resolver ecuaciones diferenciales e integrales en ciencia e ingeniería con raíces en los métodos variacionales clásicos. Para ello se comienza reformulando el problema a una formulación variacional de la forma:

Hallar $$u \in V \ t.q. \ F(u) = \min_{v \in V} F(v)$$

Donde V es un espacio funcional de dimensión finita. La idea del método es resolver el problema en un subespacio $V_h \subset V$ de funciones polinomiales a trozos.

La ventaja de los métodos de elementos finitos radica en que es algorítmico, característica que facilita su programación para sistemas de diversas geometrías. Al igual que para los métodos de diferencias finitas, la exactitud de de los resultados depende del número y tamaño de los elementos de la grilla.

1.2.3 Métodos de Elementos de Contorno (MEC)

El Método de los Elementos de Contorno (MEC) es un resultado más de la aparición y vertiginoso desarrollo de las computadoras en la segunda mitad del

siglo XX. Como en otros casos, las posibilidades de cálculo que ofrece una computadora han servido para abordar la aplicación práctica de formulaciones teóricas establecidas mucho antes.

En general, se atribuye a Jaswon [42], en 1963, la primera técnica numérica asimilable al MEC, denominada “método indirecto”. Dicha técnica fue utilizada por Jaswon para resolver las ecuaciones integrales de Fredholm [43] en el estudio de problemas de potencial.

Algo más tarde, en 1967, Rizzo [44] publicó el llamado “método directo” para la solución de problemas de elasticidad, basándose en la solución fundamental de Kelvin para un medio elástico infinito. A partir de 1975, el MEC se puede considerar un procedimiento de cálculo establecido, al menos a nivel académico, y genera ya un flujo más o menos continuo de publicaciones.

EL MEF o el MDF pueden clasificarse como métodos numéricos de “dominio”. En esta clase de técnicas el dominio Ω de definición del problema, o dominio de cálculo, se subdivide en subdominios, celdas o elementos. Luego, la aproximación numérica a la solución del problema de campo se construye a partir de funciones que satisfacen, por su definición, las condiciones de contorno del problema de modo parcial o total.

Otra posibilidad para construir la aproximación numérica es utilizar funciones que satisfagan las ecuaciones del problema en el dominio Ω, aunque no cumplan de entrada las condiciones de contorno. Este tipo de técnicas se conocen, por contraposición a los anteriores, como métodos de contorno.

Los métodos de contorno tienen algunas ventajas importantes sobre los métodos de dominio:

- Trabajan solo sobre el contorno S del dominio de cálculo Ω. Es mucho más sencillo definir el contorno que definir el dominio completo. En particular, el

MEC requiere únicamente la discretización del contorno, lo cual trae consigo una reducción de la dimensionalidad del problema con respecto al MEF o al MDF.

- Pueden tratar más fácilmente problemas que involucren dominios infinitos.
- Se obtiene el mismo grado de precisión en las dos variables duales del problema (p. ej. desplazamientos, tensiones, potenciales, flujos, etc.).

Por otro lado, hay que decir que los métodos de contorno trabajan con los valores de las funciones incógnitas en el contorno. Entonces, si se desean calcular valores en puntos internos del dominio, es preciso establecer un algoritmo complementario que, en general, es relativamente complicado.

1.3 ESTADO DEL ARTE EN SIMULACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA

1.3.1 Diseños de Protección Catódica usando un Método de Ecuación Integral Numérica.

J. W. FU y J. S. K. CHOW [26], introdujeron un método numérico computarizado, el cual calcula la distribución del potencial y la corriente en sistemas de protección catódica. El método usa la fórmula de Green para resolver la ecuación de Laplace, la cual es la ecuación que gobierna la distribución de los potenciales en celdas electroquímicas.

Para entornos homogéneos, el método empleado resultó más eficiente que otros métodos de diferencia finita o elementos finitos [26].

1.3.2 Determinación de las leyes de polarización por medidas integradas a herramientas numéricas

Strommen, R., y Rodand [28], en su artículo determinaron las leyes de polarización que se dan en un proceso de electro chapado.

El software **CASTOR ELEC3D**, en un espacio tridimensional, simula la distribución de la deposición de la película, muchas celdas industriales han sido modeladas y los resultados numéricos están de acuerdo con las medidas de deposición.

El método numérico está basado en MEC, usando técnicas iterativas de Newton – Raphson para la solución de condiciones de frontera experimentales y no lineales.

1.3.3 Algoritmos genéticos para problemas inversos de Protección Catódica.

Luiz C. Wrobel y Panayiotis Miltiadou[24] presentan una metodología de MEC acoplado con algoritmos genéticos en problemas inversos en ingeniería de corrosión. Trabajaron en la identificación de parámetros característicos en las curvas de polarización, la identificación de poros en los recubrimientos y la optimización del posicionamiento de los ánodos y sus corrientes drenadas.

Realizan una combinación de MEC como una optimización basada en los principios evolutivos de los algoritmos genéticos, obtienen una técnica numérica robusta y eficiente para problemas inversos en ingeniería de corrosión, identifican curvas de polarización, presentan un ejemplo numérico en 3D incluyendo una curva de polarización no lineal en un electrolito infinito.

Representan los ánodos como puntos o líneas para problemas en 2D y esferas para problemas en 3D, para poder moverlos y así determinar la mejor ubicación de ellos, para lograr una mejor distribución de potencial en el área a proteger.

Para la identificación de poros se dio un ejemplo numérico en 3D, incluyendo número de defectos y ruidos desconocidos en los sensores, con los cuales se demostró la viabilidad de esta aproximación, determinando que la solución del problema es muy estable, por otra parte el ruido en los sensores no causo diferencias significativas en la localización de los defectos.

2. ADAPTACIÓN DEL MODELO MATEMATICO

2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El proceso de simulación del nivel de protección catódica en el casco de las embarcaciones, se identifican dos fases en la solución numérica del modelo propuesto:

- Generación de los elementos finitos
- Solucionar el sistema generado por los elementos finitos

En la primera fase es necesario determinar cómo se construyen los elementos finitos y como es su comportamiento dentro de la región de solución. También se hace necesario calcular los requerimientos de corriente para la estructura teniendo en cuenta algunos parámetros como la temperatura, salinidad y duración del recubrimiento en el ambiente al que será sometido durante su funcionamiento diario.

La segunda fase busca simular los niveles de protección catódica sobre una región determinada, calculando el potencial de la región al resolver la ecuación de Laplace con una condición de frontera definida y tiene como finalidad mostrar los niveles de protección catódica en dicha región determinada.

2.1.1 Ecuación de Laplace

$$\sigma \nabla^2 V = 0 \qquad \text{Ecu. (2.1)}$$

Donde:

σ : Conductividad del medio

V : Potencial en la estructura

Se usa la ecuación de Laplace como función inicial dado el fenómeno eléctrico en problemas de transferencia de energía sobre superficies.

Dado que el medio en nuestro caso es el mar, el valor de conductividad estará dado por la conductividad del mar la cual depende de la salinidad y la temperatura.

Para nuestro caso trabajamos con tres (3) variables independientes que son la ubicación espacial (x, y) y el tiempo (t), tomando como base el plano extendido de la embarcación, a partir de la ley de OHM microscópica

$$\vec{J} = -\sigma \vec{\nabla} V \qquad \text{Ecu. (2.2)}$$

$\vec{J}$ = Vector de densidad de corriente

2.1.2 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera deben ser satisfechas por la solución del problema, esto otorga la particularidad a la solución encontrada, ya que un problema de ecuaciones diferenciales parciales puede tener infinitas soluciones.

$$V_h = V(x_h, y_h) \qquad \text{Ecu. (2.3)}$$

(x_h, y_h) = La coordenada del ánodo h

V_h : Potencial en el lugar donde están ubicado el ánodo.

Existen dos posibilidades para las condiciones de frontera. Una manteniendo constante la corriente, el cual es el caso de los sistemas de corriente impresa; y

otra manteniendo la diferencia de potencial constante, para el caso de los sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio, esto ocurre porque la diferencia de potencial se debe a la diferencia entre los potenciales de circuito abierto de los elementos en contacto (sin importar dimensiones ni masa), que en nuestro caso es el material del ánodo y el material de la embarcación.

2.2 METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

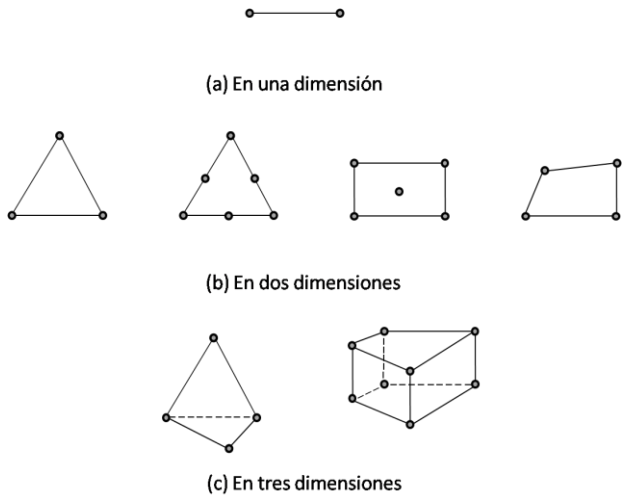
El análisis por elementos finitos de un problema de transferencia de energía involucra cuatro pasos simples:

- Discretización del área de solución en un número finito de sub-áreas o elementos.
- Derivar las ecuaciones que rigen cada elemento.
- Ensamble de todos los elementos de la región solución.
- Solucionar el sistema de ecuaciones obtenidas.

La discretización de un espacio continuo involucra la división de la región de solución en varias subregiones llamadas elementos finitos. A continuación se mostraran los elementos típicos utilizados en la solución de problemas de una dimensión, dos dimensiones y tres dimensiones.

Dado que el problema de protección catódica es un problema de potenciales eléctricos sobre una estructura metálica, a continuación se mostrará cómo aplicar los FEM en dos dimensiones para dar solución a la ecuación de Laplace $\nabla^2 V = 0$.

Figura 1. Elementos finitos básicos

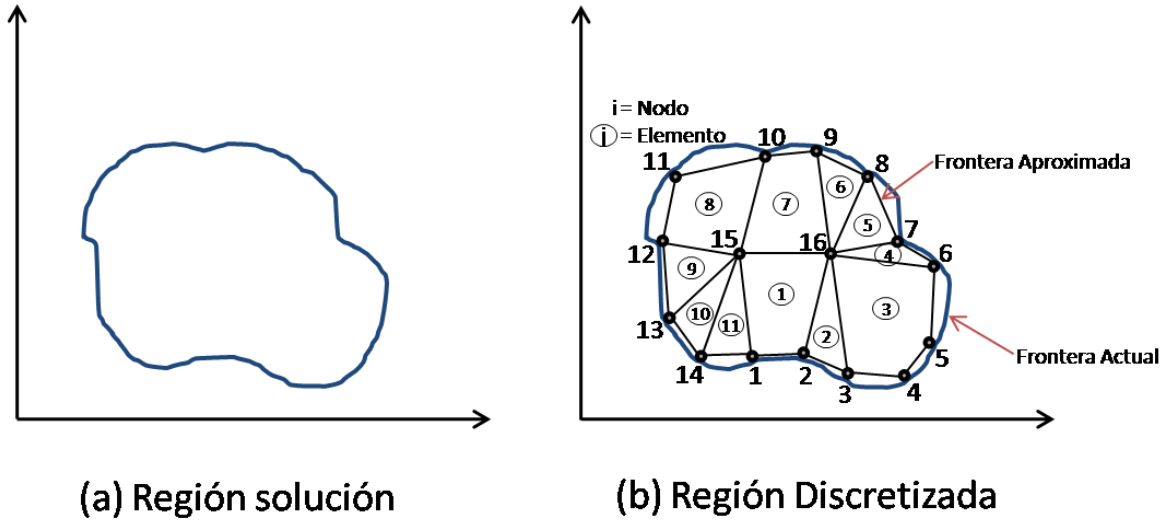


2.2.1 Discretización de los elementos finitos

Para encontrar el potencial de distribución $V(x_h, y_h)$, en la región de solución bidimensional mostrada en la Figura 2 (a), se debe dividir la región en un número finito de elementos como se muestra en la Figura 2 (b).

Aunque la forma geométrica de los elementos finitos puede variar, es decir existen varios tipos de elementos en dos dimensiones (en una misma región), en la práctica y porque las regiones analizadas son muy extensas solo se aplica un único tipo de elemento finito. Para el desarrollo de la implementación de los elementos finitos se utilizarán los elementos finitos de forma triangular con tres nodos.

Figura 2. Discretización del área de solución



A continuación se buscara una aproximación para el potencial V_e, dentro de un elemento e y luego interrelacionamos el potencial de distribución en varios elementos, dado que el potencial es continuo sobre las fronteras inter-elementales. La solución aproximada para la región total será:

$$V(x,y) \approx \sum_{h=1}^{N} V_h(x_h, y_h) \qquad \text{Ecu. (2.4)}$$

Donde N es el número de elementos triangulares en los cuales está dividida la región de solución. La forma más común de aproximación para V_e dentro de un elemento es una aproximación polinomial, de la forma:

$$V_e(x_e, y_e) = a + bx_e + cy_e \qquad \text{Ecu. (2.5)}$$

Las constantes a, b y c deben ser determinadas. El potencial V_e, en general es diferente de cero al interior del elemento e pero cero fuera de él. Nótese que la

suposición de variación lineal de potencial dentro de un elemento triangular como en la Ecu. (2.5) es la misma, se supone que el campo eléctrico es dentro del elemento:

$$\mathrm{E}_e = -\nabla V_e = -\left(b\vec{e}_x + c\vec{e}_y \right) \qquad \text{Ecu. (2.6)}$$

2.2.2 Ecuaciones que rigen los elementos

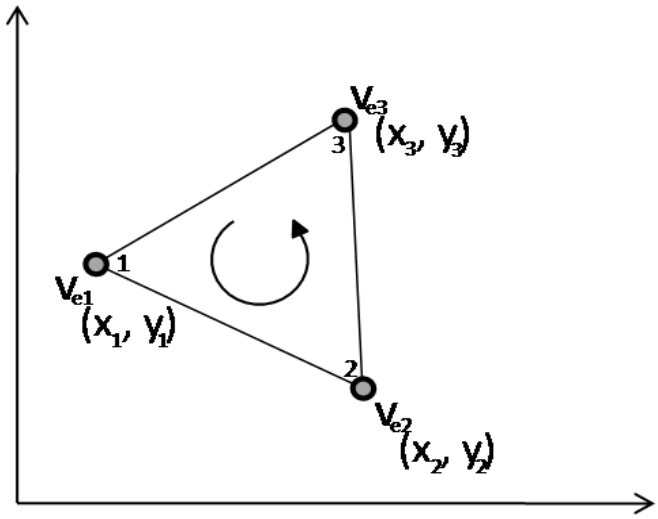
Considerando un elemento triangular típico, como el mostrado en la Figura 3. El potencial $V_{e1}, V_{e2}\ V_{e3}$ en los nodos 1,2 y 3 respectivamente, es obtenido utilizando la Ecu. (2.5) es decir:

$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \qquad \text{Ecu. (2.7)}$$

Los coeficientes a, b y c son determinados de la Ecu. (2.7).

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \qquad \text{Ecu. (2.8)}$$

Figura 3. Discretización elemento triangular típico, los nodos están enumerados en sentido antihorario.



Sustituyendo esto en la Ecu. (2.5) nos da como resultado lo siguiente:

$$V_e = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (x_2 y_3 - x_3 y_2) & (x_3 y_1 - x_1 y_3) & (x_1 y_2 - x_2 y_1) \\ (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix}$$

O de otra forma:

$$V_e = \sum_{i=1}^{3} \alpha_i (x, y) V_{ei} \qquad \text{Ecu. (2.9)}$$

Donde

$$\alpha_1 = \frac{1}{2A} \left[(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3) x + (x_3 - x_2) y \right] \qquad \text{Ecu. (2.10a)}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2A}\left[(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y\right]$$ Ecu. (2.10b)

$$\alpha_3 = \frac{1}{2A}\left[(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y\right]$$ Ecu. (2.10c)

Y A es el área del elemento e, es decir

$$2A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}$$

$$= \left[(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (x_3 y_1 - x_1 y_3) + (x_2 y_3 - x_3 y_2)\right]$$

O

$$A = \frac{1}{2}\left[(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (x_3 y_1 - x_1 y_3) + (x_2 y_3 - x_3 y_2)\right]$$ Ecu. (2.11)

El valor de A es positivo si se enumeran los nodos en sentido anti horario, comenzando en cualquier punta, y observe que el potencial esta dado en cualquier punto (x, y). Dentro del elemento, este proviene del potencial de alguno de sus vértices que sea conocido, esta es una de las diferencias con el método de las diferencias finitas, donde el potencial es conocido solo en los puntos de la grilla. Note que α_i son funciones de interpolación lineal, estas son llamadas ecuaciones de forma de elemento y tiene las siguientes propiedades:

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$ Ecu. (2.12a)

$$\sum_{i=1}^{3} \alpha_i \left(x, y\right) = 1$$ Ecu. (2.12b)

Las ecuaciones de forma son mostradas en la Figura 3.

Para el modelamiento de la eficiencia de la protección catódica es necesario conocer la energía del campo eléctrico por elemento conocida como la funcionalidad (W_e)

$$W_e = \frac{1}{2}\int \varepsilon \left|\mathrm{E}_e\right|^2 dS = \frac{1}{2}\int \varepsilon \left|\nabla V_e\right|^2 dS$$ Ecu. (2.13)

La funcionalidad W_e asociada con el elemento e, se deduce de la Ecu. (2.9)

$$\nabla V_e = \sum_{i=1}^{3} V_{ei} \nabla \alpha_i$$ Ecu. (2.14)

Sustituyendo la Ecu. (2.14) en la Ecu. (2.13) tenemos

$$W_e = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3} \varepsilon V_{ei} \left[\int \nabla \alpha_i . \nabla \alpha_j dS\right] V_{ej}$$ Ecu. (2.15)

Ahora definimos en términos puntuales como

$$C_{ij}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i . \nabla \alpha_j dS$$ Ecu. (2.16)

Entonces ahora podemos escribir la Ecu. (2.15) de forma matricial

$$W_e = \frac{1}{2}\varepsilon [V_e]^t \left[C^{(e)} \right] [V_e]$$

Ecu. (2.17)

Donde t es la transpuesta de la matriz

$$[V_e] = \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix}$$

Ecu. (2.18a)

y

$$\left[C^{(e)} \right] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(e)} & C_{12}^{(e)} & C_{13}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} & C_{22}^{(e)} & C_{23}^{(e)} \\ C_{31}^{(e)} & C_{32}^{(e)} & C_{33}^{(e)} \end{bmatrix}$$

Ecu. (2.18b)

La matriz $\left[C^{(e)} \right]$ es llamada la matriz de coeficientes del elemento, el elemento $C_{ij}^{(e)}$ de la matriz de coeficientes puede ser considerado como el enganche o la unión entre los nodos i y j, este valor se puede obtener de las Ecu. (2.10) y la Ecu. (2.16), por ejemplo

$$C_{12}^{(e)} = \int \nabla \alpha_1 . \nabla \alpha_2 dS$$

$$= \frac{1}{4A^2}\left[(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3) \right] \int dS$$

$$= \frac{1}{4A}\left[(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3) \right]$$

Ecu. (2.19a)

De igual manera

$$C_{13}^{(e)} = \frac{1}{4A}\left[(y_2 - y_3)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1)\right]$$ Ecu. (2.19b)

$$C_{23}^{(e)} = \frac{1}{4A}\left[(y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1)\right]$$ Ecu. (2.19c)

$$C_{11}^{(e)} = \frac{1}{4A}\left[(y_2 - y_3)^2 + (x_3 - x_2)^2\right]$$ Ecu. (2.19d)

$$C_{22}^{(e)} = \frac{1}{4A}\left[(y_3 - y_1)^2 + (x_1 - x_3)^2\right]$$ Ecu. (2.19e)

$$C_{33}^{(e)} = \frac{1}{4A}\left[(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2\right]$$ Ecu. (2.19f)

Así

$$C_{31}^{(e)} = C_{13}^{(e)}, C_{21}^{(e)} = C_{12}^{(e)}\ C_{32}^{(e)} = C_{23}^{(e)}$$ Ecu. (2.20)

2.2.3 Ensamble de todos los elementos

Ya se ha considerado la energía de un elemento típico, ahora debemos ensamblar todos los elementos de la región de solución. La energía asociada con el ensamble de elementos es

$$W = \sum_{e=1}^{N} W_e = \frac{1}{2}\varepsilon\left[V\right]^t\left[C\right]\left[V\right]$$ Ecu. (2.21)

Donde

$$[V]=\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \\ \vdots \\ V_{n} \end{bmatrix}$$ Ecu. (2.22)

n = Es el número de nodos

N = Es el número de elementos.

C = es llamada la matriz de coeficientes globales, la cual es ensamblada con la matriz de coeficientes individuales.

Se debe tener en cuenta algunas propiedades de la matriz C, que saltan a la vista cuando se ensambla adecuadamente:

- Que es una matriz simétrica $\left(C_{ij}=C_{ji}\right)$, al igual que la matriz de coeficiente de los elementos.
- Si $\left(C_{ij}=0\right)$, es porque no hay comunicación entre estos nodos, esto es de esperarse ya que para un número grande de elementos de $[C]$, esta deberá extenderse. también se puede ver agrupada por sectores y esto se debe a una correcta y total enumeración de los nodos, es decir:

$$\sum_{i=1}^{3} C_{ij}^{(e)} = 0 = \sum_{j=1}^{3} C_{ij}^{(e)}$$

2.2.4 Solución de las ecuaciones resultantes

Para que la ecuación de Laplace sea satisfecha, debemos asegurar que la energía total en la región de solución sea la mínima y para cumplir esto necesitamos que la derivada parcial de W con respecto a cada valor nodal de potencial sea igual a cero. Es decir

$$\frac{\partial W}{\partial V_1} = \frac{\partial W}{\partial V_2} = \ldots = \frac{\partial W}{\partial V_n} = 0$$

O

$$\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0, \quad k = 1, 2, \ldots, n \qquad \text{Ecu. (2.23)}$$

Y en general si $\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0$ nos lleva a

$$0 = \sum_{i=1}^{n} V_i C_{ik} \qquad \text{Ecu. (2.24)}$$

En donde n, es el número de elementos en la grilla, además si extendemos este concepto al resto de ecuaciones (para todos los nodos), obtenemos un grupo de ecuaciones simultaneas y de la cual la solución de $[V]^t = [V_1, V_2, \ldots, V_n]$ puede ser encontrada. Esto se logra a través de los métodos iterativos.

2.3 GAUSS SEIDEL

El método iterativo utilizado en el desarrollo de la herramienta software es el método de Gauss-Seidel: Suponemos las n ecuaciones

$$[A]\{X\} = 0$$

Para resumir un poco el modelo, vamos a suponer un conjunto limitado de ecuaciones de 3x3. Si los elementos no son todos cero, la primera ecuación se puede resolver para X_1, la segunda para X_2 y la tercera para X_3, para obtener

$$x_1 = \frac{b_1 - a_{12}x_2 - a_{13}x_3}{a_{11}}, \qquad \text{Ecu. (2.25)}$$

$$x_2 = \frac{b_2 - a_{21}x_1 - a_{23}x_3}{a_{22}}, \qquad \text{Ecu. (2.26)}$$

$$x_3 = \frac{b_3 - a_{31}x_1 - a_{32}x_2}{a_{33}} \qquad \text{Ecu. (2.27)}$$

Entonces, a partir de ahora podemos empezar con el proceso de búsqueda de la solución al escoger los valores iniciales de las x. La forma más simple de obtener los valores iniciales es suponer que todos son cero. Estos ceros se pueden sustituir en la ecuación Ecu. (2.25), la cual se puede utilizar para calcular el primer valor de $x_1 = b_1 / a_{11}$. Después se sustituye en valor de x_1 junto con los ceros para x_3 en la ecuación Ecu. (2.26) y calcular el primer valor de x_2. Este proceso se repite para la ecuación Ecu. (2.27). Una vez termina este proceso, se vuelve a la primera ecuación y se repite todo el procedimiento hasta que la solución converja lo suficientemente cercana a los valores reales. La convergencia se puede verificar usando el criterio (Error Relativo).

$$\left|\varepsilon_{a,i}\right| = \left|\frac{x_i^j - x_i^{j-1}}{x_i^j}\right| 100\% < \varepsilon_s, \qquad \text{Ecu. (2.28)}$$

Para todas las i , donde j y $j-1$ son las iteraciones actuales y previas. Aunque el criterio es muy usado tiene dos problemas fundamentales:

1. En algunas ocasiones es no convergente
2. Cuando converge lo hace de forma muy lenta

Es decir, el sistema converge dependiendo de la manera en la cual son planteadas las soluciones. Además, aun en estas instancias donde la convergencia es posible, la divergencia puede ocurrir si los valores iniciales son insuficientemente cercanos a la solución verdadera.

Entonces para asegurar la convergencia, el elemento diagonal debe ser mayor que el elemento fuera de la diagonal para cada renglón. Ahora para un sistema de *n* ecuaciones esto es expresado como

$$\left|a_{ii}\right| > \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} \left|a_{i,j}\right| , \qquad \text{Ecu. (2.29)}$$

Es decir, el coeficiente diagonal en cada una de las ecuaciones debe ser mayor que la suma del valor absoluto de los otros coeficientes de la ecuación. El criterio es suficiente pero no necesario para la convergencia. De esta forma, aunque algunas veces el método trabaja sin cumplir la ecuación (2.29), la convergencia se garantiza si la condición se satisface. Los sistemas que cumplen con la ecuación son llamados diagonalmente dominantes.

Para resolver estos problemas se plantearon mejoras a la convergencia por medio de relajación.

2.3.1 Relajación

La *relajación* representa una ligera modificación al método de Gauss-Seidel y está diseñada para mejorar la convergencia. Después que se calcula un nuevo valor de x por medio de la ecuaciones 2.26, 2.27, 2.28. Ese valor se modifica por un promedio ponderado de los resultados de las iteraciones anterior y actual:

$$x_i^{nuevo} = \lambda x_i^{nuevo} + (1-\lambda) x_i^{anterior} \qquad \text{Ecu. (2.30)}$$

Donde λ es un factor ponderado que tiene un valor entre 0 y 2.

Si $\lambda = 1$, $(1-\lambda)$ es igual a 0 y el resultado no se modifica. Sin embargo, si λ está entre 0 y 1, el resultado es un promedio ponderado de los resultados actuales y previos. Este tipo de de modificación es conocido como subrelajación. Se emplea típicamente para hacer que un sistema no convergente, converja o apresure la convergencia al amortiguar sus oscilaciones.

Para valores entre 1 y 2, se le da una ponderación mayor sobre el valor actual, en este caso, hay una suposición implícita de que el nuevo valor se mueve en dirección correcta hacia la solución real, pero con una velocidad muy lenta. Por lo tanto se pretende que la ponderación extra de λ mejore la estimación al llevarla más cerca de la verdadera. De aquí que este tipo de modificación, al cual se le llama sobrerrelajación, este designado para acelerar la convergencia de un sistema que ya es convergente. El planteamiento es conocido como sobrerrelajación simultánea o sucesiva, o SOR.

La elección de un valor adecuado de λ es en gran medida un problema especifico y con frecuencia se determina empíricamente. Si el sistema bajo estudio va a ser resuelto repetidamente, la eficiencia que se introduce por una prudente elección de λ puede ser muy importante.

2.4 MODELAMIENTO DE PÉRDIDA DE MASA EN UN ÁNODO CON BASE EN LA LEY DE FARADAY

La pérdida de masa o degradación del ánodo (x), está dada por el drenaje de corriente, para esto es necesario que se desprendan iones del ánodo. Si la corriente es constante:

$$x = \frac{M * I * t}{n * F}$$ Ley de Faraday

Donde:
x = Masa perdida.
M = Peso molecular
I = Corriente
t = tiempo
n = Número de electrones
F = Constante de Faraday.

Dado que la corriente depende del tiempo tenemos

$$x = \frac{M}{nF} \int_{t1}^{t2} Idt$$

Esta función representa la degradación del ánodo a medida que drena corriente y transcurre el tiempo.

Relación de masa y corriente drenada

$$dx = -\frac{M}{nF} Idt \qquad x_o = x \tag{1}$$

$$\vec{J} = -\sigma \left(\frac{\partial V}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{e}_z \right) = -\sigma \vec{\nabla} V \tag{2}$$

σ = Conductividad del medio

De la ecuación (2) se puede obtener la corriente drenada por un ánodo

$$\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = 0 \qquad (3)$$

Esta última ecuación representa la ley de la conservación de la energía, ya que no hay pérdida ni ganancia de corriente eléctrica durante el proceso de corrosión.

De (2) y (3)

$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$, si la conductividad σ tiene valor constante.

En regiones de la frontera donde hay valores determinados de corriente,

$V_i = C_i$ *Donde están los ánodos.

Las fuentes de voltaje son condiciones de frontera de Dirichet (La variable dependiente V tiene un valor definido, este es el caso de modelos con ánodos de sacrificio).

$i = f(V)$ Curva de polarización.

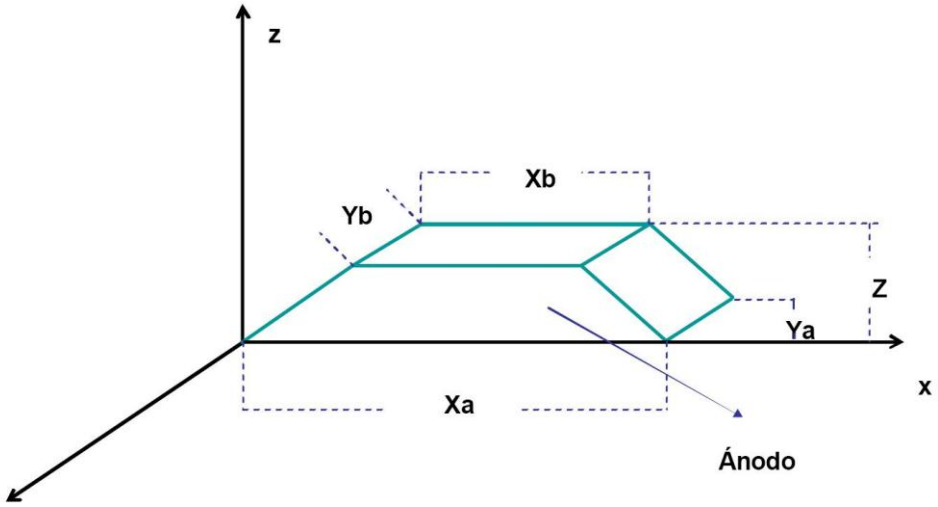
$C_i = V_{ánodo\,i} - V_{BA}$ Por cada ánodo.

C_i : es la diferencia de potencial entre el material anódico ($V_{ánodo\,i}$) y el material de la embarcación (V_{BA}), este depende solamente de las propiedades de estos elementos, específicamente del potencial en circuito abierto.

2.5 MODELO DE DEGRADACIÓN DEL ÁNODO

Debido a que el ánodo se degrada es necesario saber como es este proceso de degradación y representarlo tanto para el área superficial del ánodo, sin incluir la parte inferior, ya que generalmente está protegida por un recubrimiento.

Figura 4. Representación esquemática del ánodo trapezoidal.



Es indispensable que el área superficial quede en función de la altura, ya que por observaciones en pruebas de laboratorio (celdas) y en campo (ánodos gastados), el ánodo pierde principalmente altura, quizá provocado por el recubrimiento de su base.

$$A=XaYa + XbYb + 2(XbZ + XdZ) + 2(YbZ + YdZ)$$

$$Xd=\frac{Xa - Xb}{2}, \qquad Yd=\frac{Ya - Yb}{2}$$

$$A=XaYa + XbYb + XbZ + XaZ + YbZ + YaZ$$

2.5.1 Cálculo del volumen del ánodo

Por medio de integrales de volumen:

$$V = \int_{0}^{Z_0} \int_{\frac{(Ya-Yb)^2 Z}{2Z_0}}^{\frac{-(Ya-Yb)^2 Z}{2Z_0}} \int_{\left(\frac{(Xa-Xb)^2 Z}{2Z_0}\right)}^{\left(\frac{-(Xa-Xb)^2 Z}{2Z_0}\right)} dxdydz$$

$$V = \int_{0}^{Z_0} \left[XaYa - \frac{Z}{Z_0}\left[Xa(Ya-Yb) + Ya(Xa-Xb) \right] + \frac{Z^2}{Z^2_0}\left(Xa-Xb\right)\left(Ya-Yb\right) \right] dZ$$

Similar a la función que representa el área superficial del ánodo, el volumen también debe estar en función de su altura (Z), por las razones anteriormente mencionadas.

$$V = \frac{Z}{6}\left(6XaYa - 3Xa\left(Ya-Yb\right) - 3Ya\left(Xa-xb\right) + 2\left(Xa-Xb\right)\left(Ya-Yb\right)\right)$$

2.6 FACTORES ADICIONALES INCLUIDOS EN EL MODELO

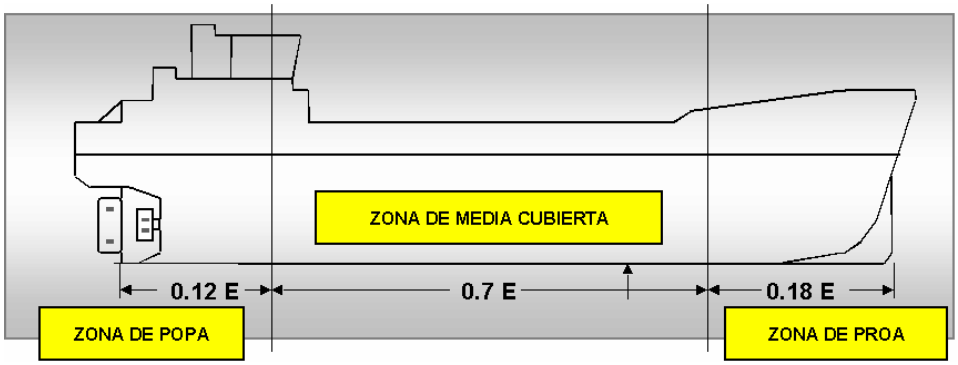
2.6.1 Factor de área

Para realizar la distribución de los ánodos de sacrificio se recomienda definir la obra viva de la embarcación en tres zonas que principalmente son: Zona de Popa, Zona de Media Cubierta, Zona de Proa, en razón a que las condiciones bajo las

cuales esta cada una, afectan en mayor o menor grado el desempeño del sistema de protección catódica.

Cada zona puede ser representada por una distancia longitudinal, definida como la eslora máxima de la embarcación; tal como se ilustra en el siguiente esquema:

Figura 5. Zonas de la embarcación definidas en función de la eslora máxima.



Zona de Popa: Puede definirse como *0,12 * E* (Eslora máxima).
Zona de Media cubierta: Puede definirse como *0,7 * E* (Eslora máxima).
Zona de Proa: Puede definirse como *0,18 * E* (Eslora máxima).

En virtud a que cada zona presenta diferente grado de exigencia al sistema de protección catódica (mayor o menor demanda de corriente), la cantidad de ánodos a instalar por zona debe estar acorde a estos niveles de exigencia.
La zona que presenta mayor demanda de corriente es la *Zona de Popa*, ocasionada principalmente por efectos hidrodinámicos (erosión-cavitación), los cuales generan mayor degradación del sistema de recubrimiento e integridad de los ánodos. Por tal razón se recomienda ubicar el *40%* del número total de ánodos calculados según el diseño en esta zona.

La zona de proa presenta un menor nivel de exigencia en comparación con la zona de popa, sin embargo esta también es afectada por efectos hidrodinámicos

(esfuerzos de corte) que ocasionan deterioro en el recubrimiento. En esta zona se recomienda ubicar el *20%* del número total de ánodos calculados según el diseño. En la zona de Media Cubierta se recomienda ubicar el *40%* del número total de ánodos calculados según el diseño [50].

2.6.2 Factor de geometría

Se consideró que las geometrías diferentes a una superficie plana y extendida, podrían generar alteraciones al comportamiento del sistema de protección catódica [50]. Razón por la cual, para establecer la existencia de estos factores, relacionados con la incidencia de cambios geométricos en la superficie, se compararon los comportamientos de los sistemas cuando se encontraban instalados en superficies con geometría que presenta doblez a 90º y 135º, llegando a la siguiente conclusión: un ángulo de 90º en la geometría de la estructura de la embarcación, representa un factor de ampliación de área en el rango de 1.72 a 2.36 del área real, y un ángulo de 135º una ampliación en el rango de 1.22 a 1.42. La expresión en términos de rangos de estos factores y no de valores absolutos, obedece a la dependencia de la vida útil real del sistema respecto de la distancia inter-anódica.

2.7 RESUMEN DEL MODELO ADAPTADO

- $\sigma \nabla^2 V = 0$ Si σ = constante, entonces $\nabla^2 V = 0$ (Ecuación de Laplace).
- $V = Ca$ Condiciones de frontera (Donde se ubican los ánodos).
- Relación Masa anódica, corriente y tiempo (proviene de la Ley de Faraday).
- $\vec{j} = -\sigma \vec{\nabla} V$ Relación corriente – potencial.
- $x = pM$ Restricción de masa anódica. Se tiene como inaceptable un ánodo cuando su masa sea menor a un porcentaje dado, de su masa inicial.

- $i = \frac{V^0{}_c - V_a}{R_a}$ Drenaje de corriente de un (1) ánodo (Capacidad de drenaje).
- $R_a = \frac{0,375\rho}{\sqrt{A_s}}$ Relación de área superficial y resistencia anódica [48].
- $Fc = a + bt$ Si hay preparación de superficie [48].
- $i = \frac{Ac * Fc * J}{Na}$.
- $A=XaYa + XbYb + XbZ + XaZ + YbZ + YaZ$. Área superficial del ánodo en función de su altura.
- $V = \frac{Z}{6}\left(6XaYa - 3Xa\left(Ya - Yb\right) - 3Ya\left(Xa - xb\right) + 2\left(Xa - Xb\right)\left(Ya - Yb\right)\right)$ Volumen del ánodo en función de su altura.

Donde:

σ = Conductividad.
x = Pérdida de masa.
i = Corriente drenada por un ánodo.
F = Constante de Faraday.
m = Peso molecular.
M = Masa de un ánodo.
$(1-p)$ = Porcentaje de utilización de un (1) ánodo.
As = Área superficial del ánodo
ρ = Resistividad del medio.
Fc = Factor de rompimiento del recubrimiento.
J = Densidad de corriente.
Na = Número de ánodos instalados.
$c = V^0{}_c - V_a$ = Constante.

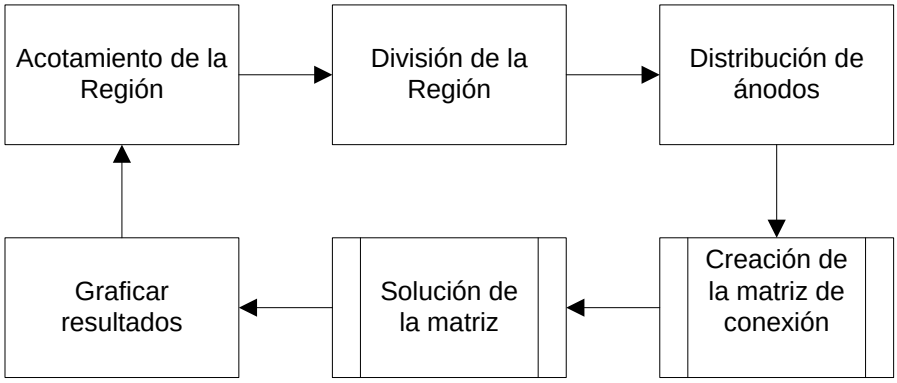
3. DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE LA SOLUCION

A continuación de describirán las etapas y las metodologías utilizadas en el desarrollo implementado en el software Protek DS para la estimación de la solución, cabe resaltar que los resultados del modelo fueron validados y mejorados con base en la experiencia de los constructores navales y teniendo en cuenta los costos de construcción y mantenimiento naval.

La implementación del método numérico se realizó en seis (6) etapas, en orden de ejecución, son:

- Acotamiento de la región
- División de la región
- Ubicación de los ánodos
- Creación de la matriz de conexión
- Solución de la matriz de coeficientes
- Gráficas de resultados.

Figura 6. Etapas del desarrollo de la solución



3.1 ACOTAMIENTO DE LA REGIÓN

La región de estudio está comprendida entre las líneas imaginarias de la embarcación llamadas líneas de flotación y la quilla, esta área corresponde a la parte de la embarcación sumergida en el electrolito, también llamada área húmeda.

El plano de las embarcaciones está esquematizado en un dibujo CAD Shell Expansión, en el cual están nombradas las diferentes líneas que conforman el diseño estructural exterior de la embarcación. A través de una librería de clases se recorre este archivo y se va graficando sobre un panel solo las líneas de cubierta y línea de flotación, de esta manera seleccionamos la carcasa general y el área húmeda. Es importante tener en cuenta que las líneas de este diseño CAD deben ser poli-líneas, para que puedan ser leídas por las subrutinas de la clase.

Figura 7. Plano CAD

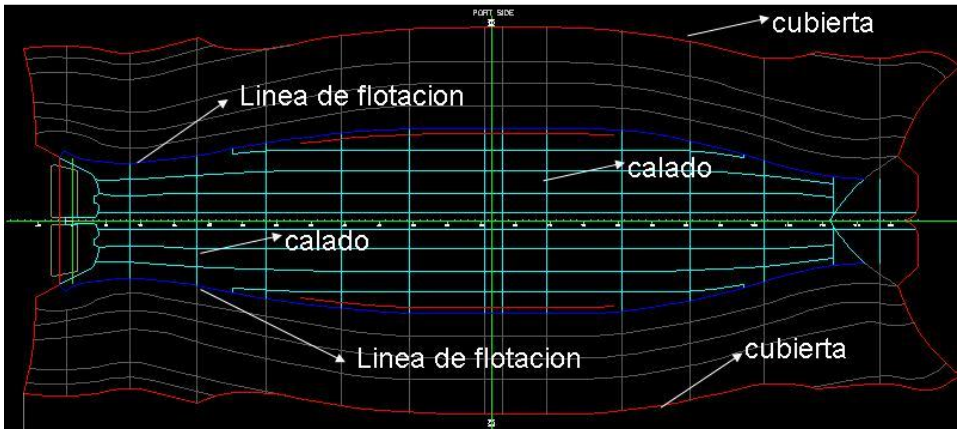
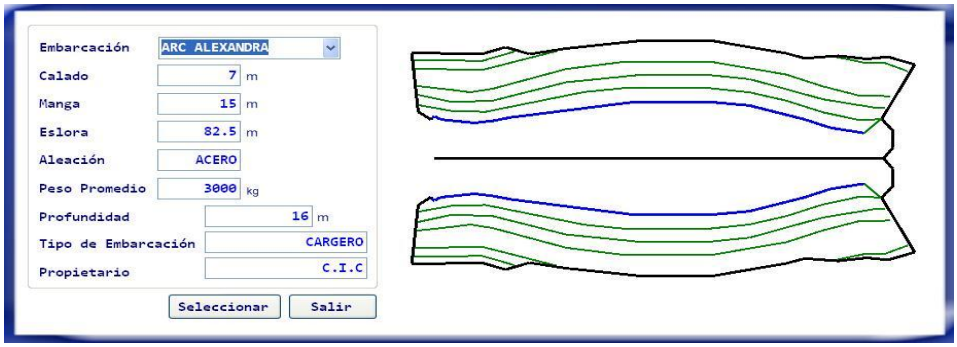


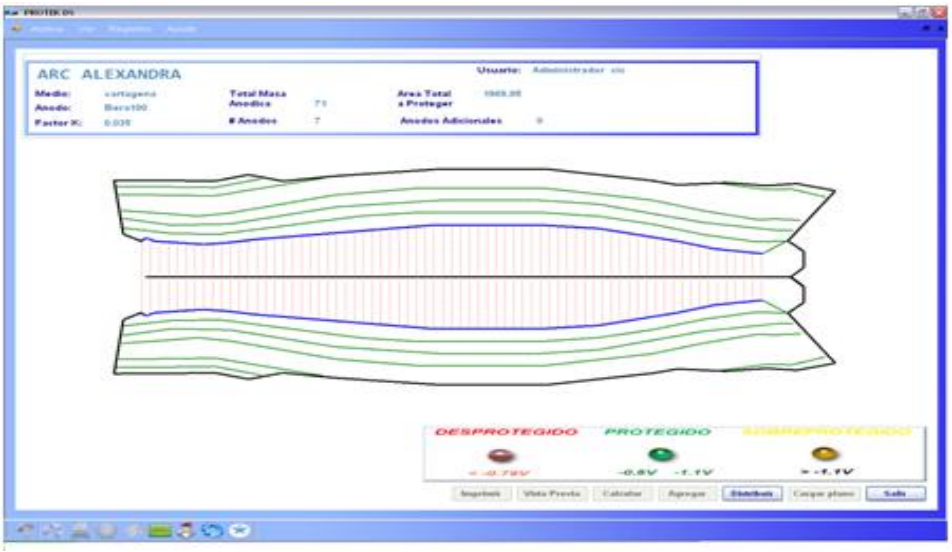
Figura 8. Plano cargado en el Protek DS



3.2 DIVISIÓN DE LA REGIÓN

Luego de tener la región delimitada sobre el panel, se recorre en dirección de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha y se van recogiendo en un vector todos los puntos que están entre las líneas de flotación, estos puntos asemejan coordenadas dentro del plano de la embarcación, a cada punto se le asigna un número empezando la numeración desde el cero, esta información se almacena en el vector de puntos.

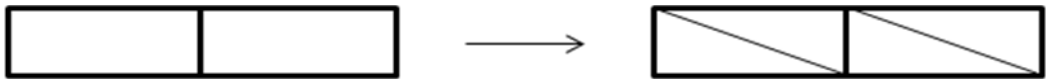
Figura 9. División del área de trabajo para el software Protek DS



Conociendo todas las posiciones dentro del plano, se recorre el vector para formar parejas de puntos que formen rectángulos fijos contiguos y que estén dentro del área seleccionada, estas parejas de coordenadas son almacenadas en una matriz, estos rectángulos son graficados sobre el panel, esta es la primera división.

Para realizar un mejor análisis, se realiza una segunda división del área húmeda, la cual consiste en tomar los rectángulos y dividirlos en dos triángulos, es decir modificamos la matriz de elementos rectangulares en una matriz de elementos triangulares y son nuevamente graficados sobre en el panel, dando así una visualización de mallado uniforme sobre el área de estudio.

Figura 10. Subdivisión de elementos rectangulares a triangulares



3.3 UBICACIÓN DE LOS ANODOS

En la aplicación existen dos formas de ubicación de los ánodos: la forma manual y la forma automática. La ubicación manual consiste en ubicar sobre el panel de gráficos cada uno de los ánodos con el mouse, esta acción permite ubicar ánodos dentro del área húmeda, asignando su posición al punto más cercano dentro del mallado, puede ubicar tantos ánodos como desee o cuantos el máximo calculado lo permita.

La ubicación automática en su primera versión ubicaba un ánodo y a partir de esta posición ubicaba el resto de ánodos basándose en la distancia interánodica, dado que esta distribución podía ubicar ánodos empezando en cualquier punto de la malla, se genera una complicación con el modelo de distribución, por motivos de mantenimiento y diseño de la mayoría de las embarcaciones, los ánodos no deben estar cerca de la línea de la quilla, se plantea la modificación del sistema

automático para que realice una distribución uniforme basada en la distancia interánodica.

Figura 11. Distribución Automática

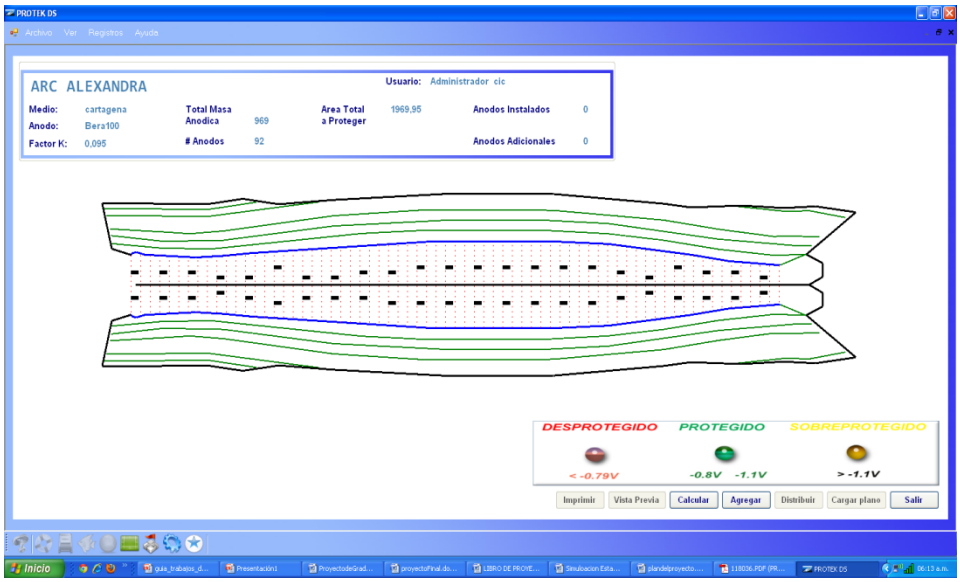
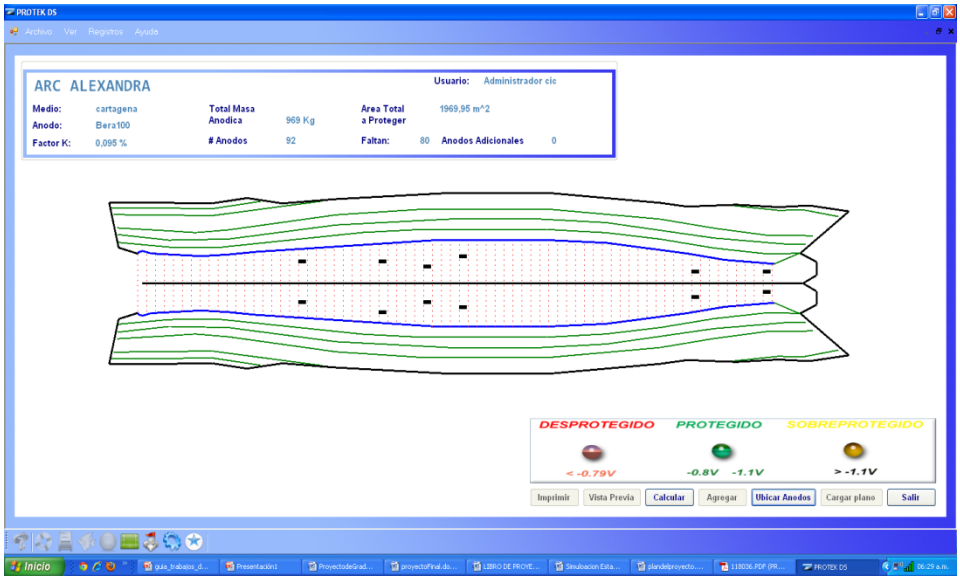


Figura 12. Distribución manual



Para efectos de la implementación, luego que los ánodos se ubican sobre los puntos del mallado, se recorre nuevamente la imagen del panel y se guardan las posiciones de los ánodos en un vector que posteriormente se convertirá en un vector de solución inicial.

3.4 CREACIÓN DE LA MATRIZ DE CONEXIÓN

La matriz de conexión es aquella que relaciona todos los elementos de la matriz de triangulación generada cuando dividimos la región del plano, para lograr esta conexión primero debemos transformar las filas de la matriz de triangulación que están en coordenadas (x, y) de panel y cambiarlas por su número correspondiente de vector de puntos, este proceso es explicado en las secciones 2.2.2 y 2.2.3. Para cada una de estas filas que contienen la información de ubicación de los respectivos elementos, se enumeran internamente en dirección anti horaria, para luego pasar a la matriz de conexión en donde se relacionan los otros elementos a través de la numeración de sus aristas. De esta manera se relacionan e intercomunican todos los puntos de la malla.

Teniendo armada la matriz de conexión, la multiplicamos por el vector de solución inicial formado por el proceso de ubicación de los ánodos, para formar una matriz de coeficientes, que a su vez es un sistema de ecuaciones que nos darán un vector solución.

3.5 SOLUCION DE LA MATRIZ DE COEFICIENTES Y GRAFICAS DE RESULTADOS

Una vez esta armada la matriz de coeficientes para cada uno de los elementos que conforman la malla, se da solución al sistema de ecuaciones con el método de Gauss Seidel y se aplica una sobrerrelajación, para ayudar a converger a la

solución; durante estos procesos iterativos se establece un número máximo de iteraciones igual a 80 y se establece un porcentaje de error máximo igual a 0.000000055, estos valores son identificados durante las pruebas como los umbrales máximos, es decir a partir de estos valores la solución no presenta cambios significativos.

La solución del sistema de ecuaciones es representada en una escala de colores que equivale a un intervalo de valores de voltajes, a continuación se describe cada rango:

- Rojo: valores menores al -0.79V.
- Verde: valores entre -0.8V y -1.1V.
- Amarillo: valores por encima de -1.11V.

Esta escala de colores es aplicada sobre el área acotada, asignando un color específico a cada punto.

Figura 13. Niveles de protección en el Protek DS

Figura 14. Resultados Protek DS en distribución automática

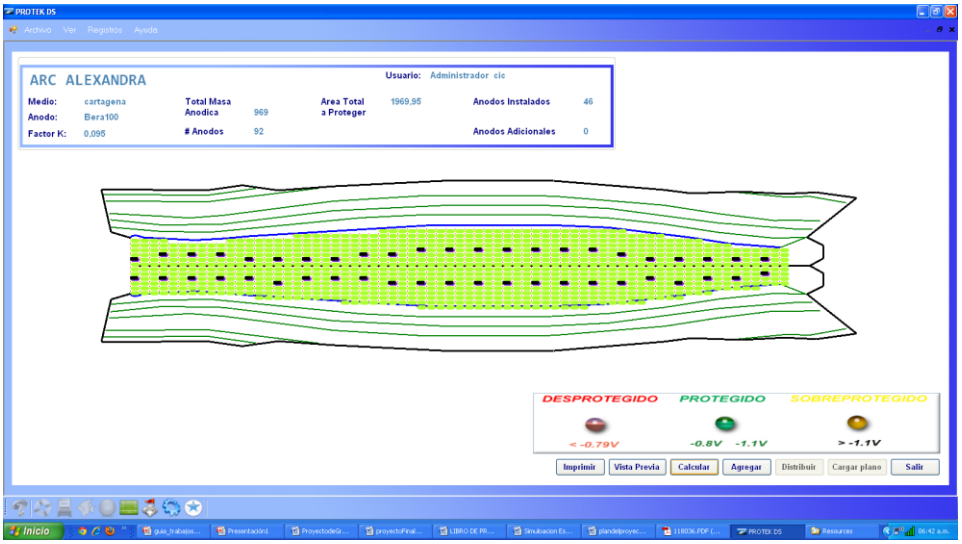
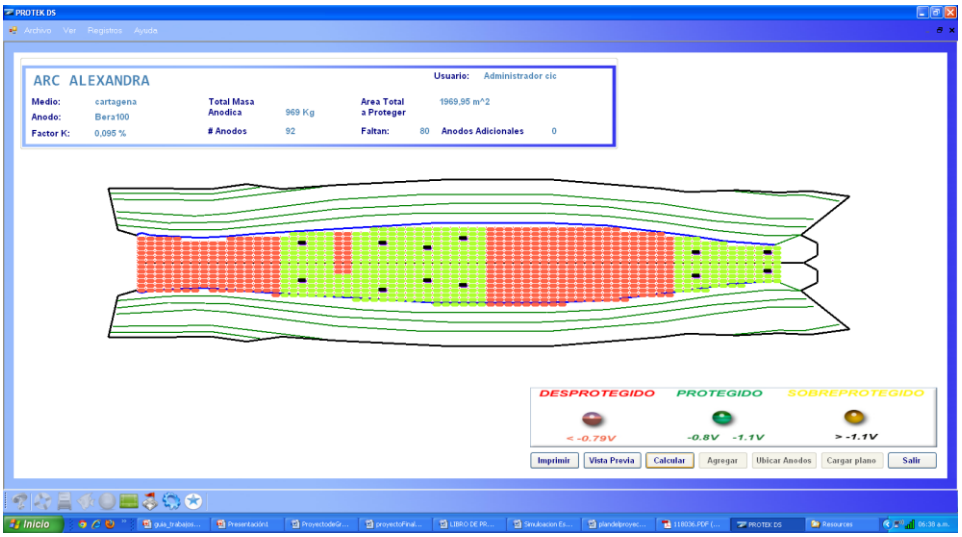


Figura 15. Resultados Protek DS en distribución manual



Se realizaron varias pruebas que buscaban la eficiencia de la solución en términos de reducción de tiempo, como resultado a este trabajo, se aplica un proceso de relajación al método numérico seleccionado para la solución del sistema de ecuaciones. También se logra establecer unos umbrales máximos de iteración y margen de error planteados en Gauss-Seidel.

4. CONSTRUCCION DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE

Para la construcción de la herramienta software se utilizó la plataforma de desarrollo Visual Studio 2008 de Microsoft, además del motor de base de datos SQL server 2005 Express, los requerimientos básicos y demás características tenidas en cuenta en el diseño son explicados en el manual de usuario construido junto con el software. Ver Anexo No. B.

El proceso de construcción de la herramienta software implicó las siguientes etapas:

- Definición de los requisitos del software
- Definición de los casos de uso.
- Construcción de la base de datos.
- Implementación de la librería de lectura de los planos.
- Construcción de las interfaces de usuario.
- Ajustes de la matriz de solución del método numérico.

4.1 DEFINICION DE LOS CASOS DE USO

Los casos de uso diseñados están en base a las características iniciales planteadas en el proyecto de Simulación y en los requerimientos planteados por el equipo técnico de la CIC. Los esquemas de cada caso de uso se encuentran en el anexo A.

4.2 MODELO DE BASE DE DATOS

La base de datos está construida en un gestor de bases de datos en versión Express, tiene un diseño básico que almacena la información requerida en el

proceso de mantenimiento de los sistemas de protección catódica y el costo asociado al proceso de reparación y mantenimiento de estos sistemas. El modelo Entidad-Relación, se encuentra en el anexo C.

4.3 IMPLEMENTACION DE LA LIBRERÍA PARA PLANOS CAD

Se construyó una librería que permite la lectura de planos CAD, que forma parte de los recursos asociados a la aplicación. Los extensión de los archivos que son utilizados por el software es *.dxf, para la lectura de estos archivos es necesario que durante el proceso de creación del plano se definan algunas capas con nombres específicos que representan las líneas y poli líneas del contorno de la embarcación, esto permite leerlos como un archivo plano y de esta forma obtener las coordenadas y longitudes de cada línea necesaria para esquematizar el plano en la herramienta software. El gráfico incluido en el manual del software (ver anexo B) contiene la descripción y nombres de dichas capas, la librería interpreta el plano como un archivo de texto y captura toda la información de las líneas y poli-líneas. Estas líneas contienen una descripción que son interpretadas por el software y son graficadas en el panel de diseño.

4.4 CONSTRUCCION DE LAS INTERFACES DE USUARIO

La construcción de una interfaz fácil de usar fue planteada como una prioridad, por tal motivo la aplicación utiliza un diseño muy parecido al de las aplicaciones Winform, cuenta con menú superior y con un panel inferior que permite navegar entre las diferentes opciones desarrolladas, también genera mensajes cuando un usuario realiza operaciones invalidas o cuando omite algún paso en el proceso de la simulación.

Una explicación más detallada de la herramienta software esta descrita en el manual de usuario (ver anexo C).

Figura 16. Menú superior Protek DS

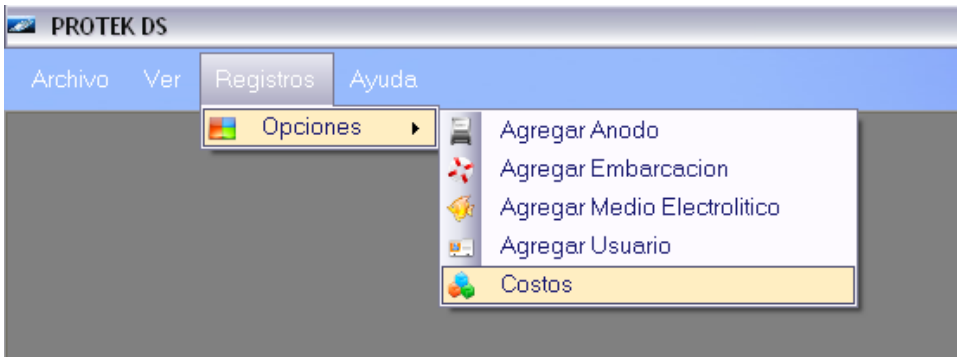
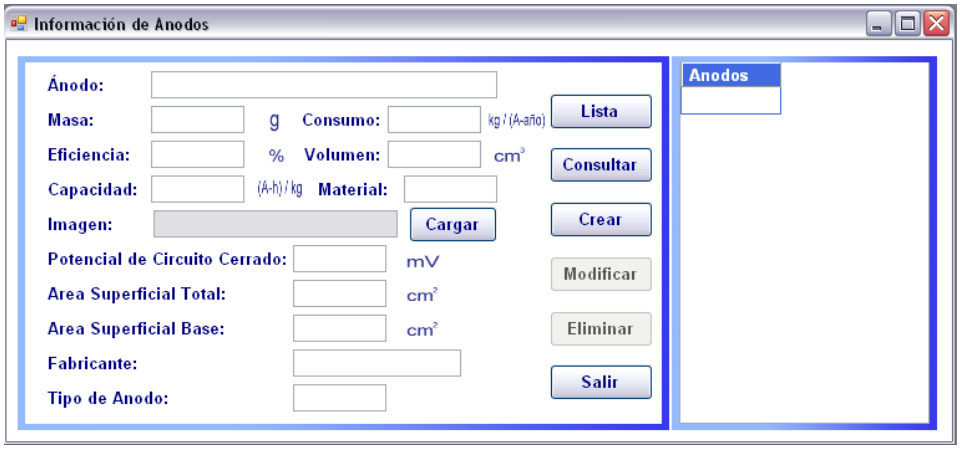


Figura 167. Formulario de ingreso de información



5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

OBJETIVO	RESULTADO ESPERADO	RESULTADO OBTENIDO	OBSERVACIONES
Desarrollar una herramienta computacional que permita predecir y simular el nivel de protección contra la corrosión en embarcaciones marítimas las cuales usan sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio.	Herramienta computacional para la predicción y simulación del nivel de protección contra la corrosión mediante el uso de sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio con aplicación a embarcaciones marítimas.	Software PROTEK DS de predicción y simulación del nivel de protección dado por un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio. Dicha herramienta entre otras cosas, permite estimar la cantidad y ubicación de los ánodos sobre las superficies de las embarcaciones, así como la distribución de los potenciales eléctricos de protección.	El objetivo se cumplió en un 100%. En el anexo C se detalla el manual de operación del software.
1. Adaptar el modelo matemático que permita manejar condiciones operacionales y ambientales.	Selección y adaptación de modelos matemáticos bajo condiciones operacionales y ambientales	Se adoptó el modelo de Laplace y se usó el método de elementos finitos para desarrollar dicho modelo. De las ecuaciones recomendadas bajo la norma	El objetivo se cumplió en un 100%.

OBJETIVO	RESULTADO ESPERADO	RESULTADO OBTENIDO	OBSERVACIONES
		DNV RP 401 es posible manejar condiciones tales como: la temperatura, conductividad del agua de mar, la categoría del recubrimiento operacional de la embarcación y del medio de exposición.	
2. Seleccionar el método numérico de acuerdo al modelo seleccionado.		El método utilizado como antes se mencionó son los elementos finitos, para resolver el sistema de ecuaciones, se utiliza el método numérico de Gauss Seidel mejorado o sobré – relajado; Este método permite resolver sistemas de ecuaciones múltiples de gran tamaño (sistemas matriciales de n variables), para dar una mayor precisión a los resultados.	El objetivo se cumplió en un 100%.

OBJETIVO	RESULTADO ESPERADO	RESULTADO OBTENIDO	OBSERVACIONES
3. Simular el modelo seleccionado mediante la construcción de una herramienta computacional que integre el método numérico y una interfaz gráfica.		El Protek DS permite a través de su interfaz grafica, importar planos en formato DXF (planos CAD), de esta manera puede mostrar las líneas de contorno de las embarcaciones (estas líneas están en dos dimensiones). También es posible ubicar los ánodos sobre el área de obra viva de la embarcación, ver los potenciales de protección y un modulo de evaluación de costos. De Igual manera los resultados de la distribución anódica se obtienen de forma grafica o se imprimen en un reporte, donde muestra el tipo de ánodo y su ubicación en el casco de la embarcación.	El objetivo se cumplió en un 100%.

OBJETIVO	RESULTADO ESPERADO	RESULTADO OBTENIDO	OBSERVACIONES
4. Validar el modelo mediante experimentación simulada en laboratorio y en campo.		Se diseñó un equipo para monitoreo en embarcaciones de tres variables simultáneas: pH, Temperatura y potencial eléctrico. El cual está construido y actualmente se está preparando su instalación en él Remolcador ARC - Ciénaga San Juan, para capturar datos de potenciales.	El objetivo se cumplió en un 100%.

Con el desarrollo de este trabajo se logró desarrollar la herramienta software Protek DS que brinda soporte a las actividades de diseño y mantenimiento de sistemas de protección catódica para las embarcaciones que entran a mantenimiento.

La Corporación para la Investigación de la Corrosión a través de este desarrollo logró sistematizar el proceso de cálculo y análisis de la eficiencia de los sistemas de protección catódica aplicados en la náutica.

La Corporación para la Investigación de la Corrosión obtiene su primer desarrollo computacional con elementos finitos abriendo horizonte hacia el desarrollo de este tipo de aplicaciones en otros tipos de fenómenos asociados a la corrosión.

Se logró desarrollar la primera herramienta computacional nacional que simula el nivel de protección catódica por ánodos de sacrificio que tiene en cuenta algunas de las diferentes variables relacionadas con la corrosión en la náutica como son la temperatura y el recubrimiento.

Se logró validar los resultados arrojados por la herramienta en campo, sobre diferentes embarcaciones y sobre los sistemas de rompe olas, pero por acuerdos de confidencialidad, estos resultados no pueden ser mostrados en este documento.

6. RECOMENDACIONES

- Con un primer paso dado en el desarrollo de este tipo de aplicaciones, se debe seguir mejorando en las técnicas de análisis utilizadas en 2D hacia un campo 3D, teniendo en cuenta la implicación de nuevos factores que afectan el fenómeno y la combinación de otras técnicas afines a los elementos finitos, generando nuevas herramientas software que puedan abordar el diseño de estructuras más complejas.

- Es importante seguir validando los resultados de niveles de protección catódica de las embarcaciones a las cuales se le instalaron los sistemas anódicos simulados por la herramienta *Protek DS.*

- Es posible plantear una nueva versión del software Protek DS que implemente un modulo que pueda diseñar la geometría de diversos elementos utilizados en la construcción y mantenimiento de embarcaciones

REFERENCIAS

[1] Ovalle G., Sistema de control de corrosión para el casco de un buque tipo patrullera de vigilancia, ISSN 0120-7733, pp. 23 – 28, Agosto de 2003.

[2] Hou L. S. y Sun W., Optimal positioning of anodes for cathodic protection, SIAM J. Control y optimization, Vol. 24, No. 3, pp. 855-873,Society for industrial and applied mathematics, Mayo de 1996.

[3] Santana D. y Adey R., Optimising the location of anodes in cathodic protection systems to smooth potential distribution, Advances in engineering software, Elsevier Ltd., pp. 1-8, 2005

[4] Fu J. W., Numerical modeling methods for galvanic corrosion and cathodic protection analyses, Westinghouse R & D center, pp. 161-175.

[5] Kasper, R.G., and April M.G: Electrogalvanic Finite Element Analysis of Partially Protected, Marine Structures, Vol. 39, No. 5, pp 181-188, May 1983.

[6] Adey R. A., Brebbia y Niku S.M., Applications of boundary elements in corrosion Engineering, pp. 34-64.

[7]. McGrath, J. N., Tighe-Ford, D. J., and Hodgkiss, L.: Modelling Impressed Current Cathodic Protection System by Dimension and Conductivity Scaling.

[8] Fleck, R. N.: MSC Thesis, Numerical Evaluation of Current Distribution in Electrical Systems, MSCThesis, University of California, Sept 1964.

[9] Sale, J. P.: The evaluation of anode configuration for the internal cathodic protection of pipes. Conference on corrosion and protection of pipes and pipelines.

[10] Strommen, R. D.: Computer Modeling of Cathodic Protection Systems Utilized in CP Monitoring, OTC 4357, Houston 1982.

[11] Fu, J. W.: Paper No. 115, NACE Corrosion Conference, Toronto, Canada 1981.

[12] Doig P., and.Flewit4 P. E.J.: A finite difference numerical analysis of galvanic corrosion. J. of Electrochem. Sot. Vol 126, No. 12 pp 2057-2063, Dec 1979.

[13] Helle, H.P.E9 Beef G.H.M., and Ligtellin, J.T.H., Numerical Determination of Potential Distributions and Current Densities in Multi-Electrode Systems Corrosion/NACZ Vol. 37, No. 9, pp 522–530, Sept.1981.

[14]. Brebbi C.A,: Boundary Element Method for Engineering, Pentech Press 1980.

[15] Fu. J.W.: A Finite Element Analysis of Corrosion Cells, Corrosion, NACE Vol. 38, No. 5, pp 9-12,1982.

[16] Kasper, R.G., and April M.G. Electrogalvanic Finite Element Analysis of Partially Protected Marine Structures, Vol. 39, No. 5, pp 181-188, May 1983.

[17]. Adey, R.A.: Modeling CP Systems, Oilmaw June 1985.

[18] Adey, R.A, Niku S.M., Brebbi C.A., and Finnegam J.: Computer Aided Design of Cathodic Protection Systems. Paper presented at the International Conference on Boundary Element Methods in Engineering Villa Olmo, Lake Como, Italy, 24th–27th sep~ 1985.

[19] Jacob, W.R: Principles of Cathodic Protection. Paper presented at Design of Offshore Cathodic Protection Systems, Computational Mechanics Centre, Southampton, 1 th Sept 1984.

[20] De Carlo, E.A.: Computer Techniques for Offshore Corrosion Protection. Imckheed Horizons, Winter 1980/81.

[21] Danso D.J. Warne, M.A.: Current Density/Voltage Calculations using Boundary Element Techniques. NACE Conference, Los Angeles, USA, 1983.

[22] Niku, S. M., and Adey, R. A CAD System for the Analysis and Design of Cathodic Protection Systems, Plant Corrosion: Prediction ofMaterials Performance, Cranfield Institute of Technology, UK February 1985.

[23] Strommen, R. et al.: Advances in Offshore Cathodic Protection Modelling using the Boundary Element Method, NACE, Material Performance, pp 23-28, February 1987.

[24] Telles, J. C. F., Wrobel, L. C., Mansur, W. J., and Azevedo, J. P.S.: Boundary Elements for Cathodic Protection Proh!ems. BoundaryElements VII, Villa Olmo, Lake Como, Italy. Computational
Mechanics Publications, 1985.

[25] Gartland, P. O., and Johnsen, R.: COMCAPS – Computer Modelling of Cathodic Protection Systems. Corrosion/85, Boston, Massachusetts, U. S. A., March 1985.

[26] Fu, J. W., and Chow, S. K.: Cathodic Protection Designs Using an Integral Equation Numerical Method. Corrosion/82. Paper No. 163,1982.

[27] Aoki, S., Kishimoto, K., and Sakata, M.: Boundary Element Analysis of Galvanic Corrosion, Boundary Elements VII, Villa Olmo,Lake Como, Italy. Computational Mechanics Publications, 1985.

[28] Strommen, R., and Rodand, A.: Computerised Techniques Applied in Design of Offshore Cathodic Protection Systems. NACE, Material Performance, pp 15-20, April 1981.

[29] Munn, R.S.: A Mathematical Model for a Galvanic Anode Cathodic Protection System. NACE, Material Performance, pp 29-32, August 1982.

[30] De Carlo, E. A.: Computer Aided Cathodic Protection Design Technique for Complex Offshore Structures. Paper No. 165, Corrosion/82, March 1982.

[31] Adey, R. A., and Niku, S. M.: Comparison Between Boundary Elements and Finite Elements for CAD of Cathodic Protection Systems. BETECH Conference, South Australian Institute of Technology, Adelaide, Australia Nov. 1985. Computational Mechanics Publications, Southampton, 1985.

[32] Niku, S. M., Brebbia, C. A., and Adey, R. A., “BEASY-CP. A CAD System for Mathematical Modelling of Galvanic Corrosion and Cathodic Protection Problems”, CADMO 86, Washington, DC, U. S. A.,September 1986, Computational Mechanies Publications,Southampton and Springer-Verlag, Berlin & NY, 1986.

[33] Niku, S. M., and Adey, R. A.: Computer Prediction of Cathodic Protection Experiments”, Unpublished report for the Department of Energy by Computational Meehanics Consultants, Ashurst, Southampton, UK, 1986.

[34] Adey, R. A., and Niku, S. M.: Computer Modelling of Galvanic Corrosion. ASTM Conference, Pheonix, Arizona, November 1986.

[35] Fu, W.J., and Chen, S. K.: Finite Element Determination of Galvanic Corrosion During Chemical Cleaning of Steam Generator, Material Performan@, pp 33-40, March 1986.

[36] Brebbia, C. A., and Niku, S. M.: Computational Applications of Boundary Element Methods for Cathodic Protection of Offshore Structures, OMAE Conference, Houston, USA, 1988.

[37] Brebbi C.A., and Domingue~ J.: Boundary Elements –An Introductory Course, 1988.
Research Laboratory, Department of the Navy, Washington D. C.203755000, U.S.A.

[39] F. Vadillo. Una Introducción al método de elementos finitos.

[40] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. the Finite elementh method, Volume 1:the basis. Butterworth-Heinemann, 2000.

[41] P.A. Tassi y C.R. Engelberger, Introducción al método de diferencias finitas.

[42]. C.Jhonson, Numerical solution of p.d.e. by the f.e.m., Cambrigde University Press, 1987.

[43]. P.A.Raviart et J.M.Thomas, Introduction l'analyse numérique de e.d.p., Masson, 1983.

[44]. G.Strang and G.J.Fix, An analysis of the _nite element mtethods, Prentice-Hall, 1973.

[45]. O.C.Zienkiewicz, The _nite element method in engineering science, McGraw-Hill, 1971.

[46] P.G.Ciarlet and J.L.Lions, Hanbook of numerical analysis. vol 2, North-Holland, 1991

[47]. Michael B. Surkein, John P. La Fontaine, Leif Brattas. A Comparison of Impressed Current and Galvanic Anode Cathodic Protection Design for an FPSO Hull. Corrosion 2004 NACE. Paper No. 04095

[48]. DET NORSKE VERITAS. Recommended practice B401. Cathodic protection desing. 1993.

[49]. CC Technologies.Cost of Corrosion[en Linea].[Fecha de la Consulta: 10 de febrero de 2009]. Disponible en: http://corrosioncost.com/home.html

[50] C.I.C Corporacion para a Investigacion de la corrosión. Proyecto Optimizacion PC, 2008

BIBLIOGRAFIA

- MORGAN, Jhon. Cathodic Protection. Second Edition. Published by NACE Press ISBN 0-915567-28-8. Copyright 1987

- SHREIR, L. L.. Corrosion Volume 2. Newnes-Butterwrths. London. 1976

- VON BAECKMANN, W., SCHWENK, W., PRINZ, W. Handbook of cathodic protection. Theory and practice of electrochemical protection processes. Third edition. Gulf publishing. 1997

- DET NORSKE VERITAS. Recommended practice B401. Cathodic protection desing. 1993.

- Computacional Mechanics BEASY. Proposal to Corporación para la Investigación de la Corrosión for the BEASY corrosion and CP software. 1st April 2004.

- FU, J. W. Galvanic corrosion Prediction and Experiments Assisted by Numerical Analisis, ASTM STP 978. H. P.Hack, Ed., American Society for testing and Materials, Philadelpia, 1988.

- KASPER, Rolf G., APRIL, Martin G. Electrogalvanic finite element analysis of partially protected marine structures. Corrosion NACE, Vol 39, No. 5 May 1983.

- STROMMEN, R., ROLAND, A. Computerized techniques applied in desing of offshore cathodic protection systems. Materials Performance. April 1981.

- R.A. Adey. Modelling of Cathodic Protection System, Vol 12. WitPress 2006.

- NACE INTERNATIONAL. Training &Certification. Level 2, 3 Y 4 Course manual. 2000.

- CC Technologies.Cost of Corrosion[en Linea].[Fecha de la Consulta: 10 de febrero de 2009]. Disponible en: http://corrosioncost.com/home.html.

ANEXOS

ANEXO A. CASOS DE USO

Descripción de los Casos de Uso.

Los casos de uso descritos a continuación están divididos de acuerdo a las actividades permitidas a cada perfil de usuario y las funcionalidades comunes. Los perfiles existentes son: Administrador y diseñador.

Perfil Administrador: Casos de Uso

- Crear, Consultar, Modificar, Eliminar la información relacionada con los ánodos
- Crear, Consultar, Modificar, Eliminar la información relacionada con los electrolitos.
- Crear, Consultar, Modificar, Eliminar la información relacionada con las embarcaciones.
- Crear, consultar, modificar, Eliminar la información relacionada con las usuarios
- Consultar, actualizar la información referente a los costos de mantenimiento

Perfil Diseñador: Casos de Uso

Los casos de uso para el perfil diseñador están descritos en las funcionalidades comunes.

Funcionalidades Comunes: Casos de Uso

- Ingresar al software a través de Login y Password.
- Seleccionar la embarcación que se va a analizar.
- Seleccionar los ánodos que se van a utilizar.
- Seleccionar el medio electrolito que se va a utilizar.
- Calcular el factor de rompimiento en base al tiempo y espesor de la película del recubrimiento.
- Calcular el número de ánodos a ubicar en la caja de mar.

- Ubicar los ánodos de forma manual y automática.
- Calcular los costos totales del mantenimiento en base a los cálculos realizados por el software.
- Consultar los contenidos de ayuda sobre el manejo del software.

Diagrama general de casos de uso

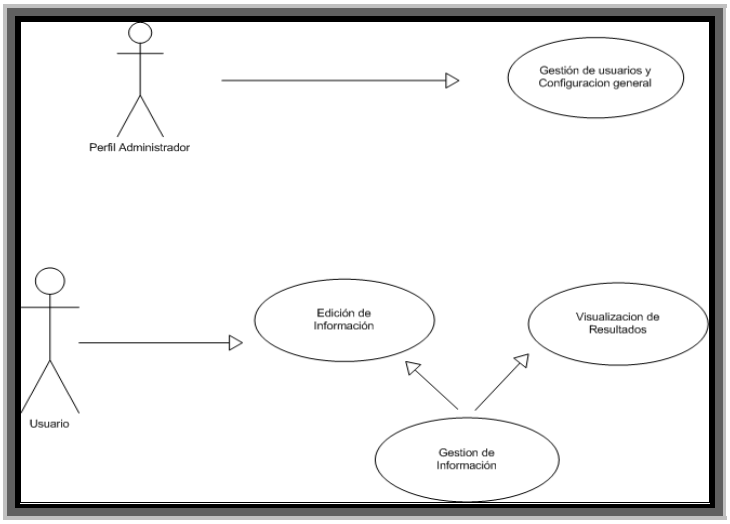


Imagen 1. Diagrama general casos de uso.

Diagramas específicos de casos de uso

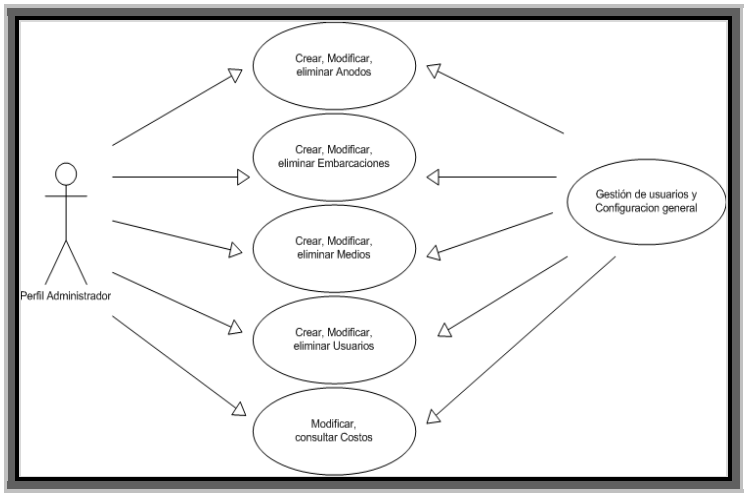


Imagen 2. Diagrama Perfil Administrador.

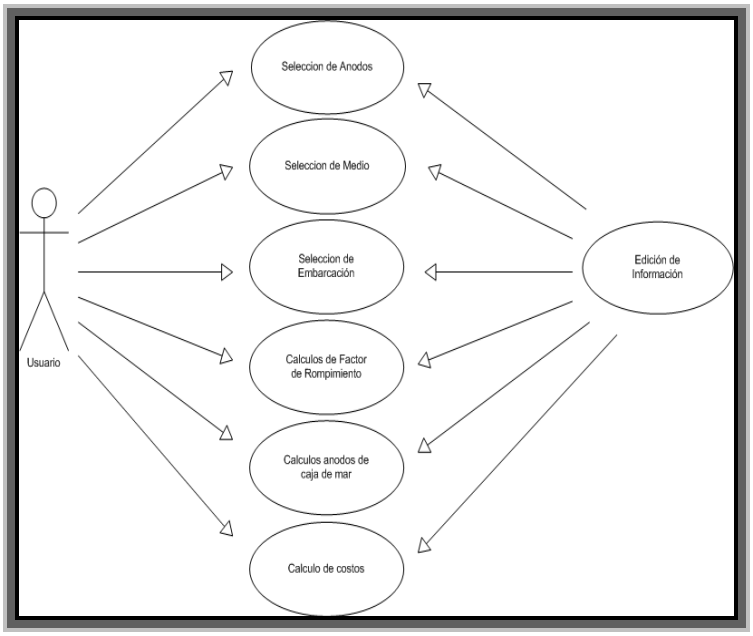


Imagen 3. Diagrama edición de información.

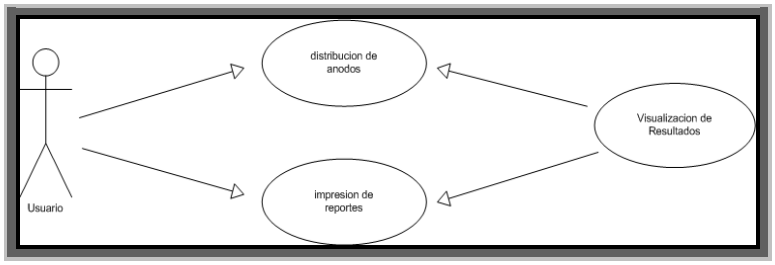
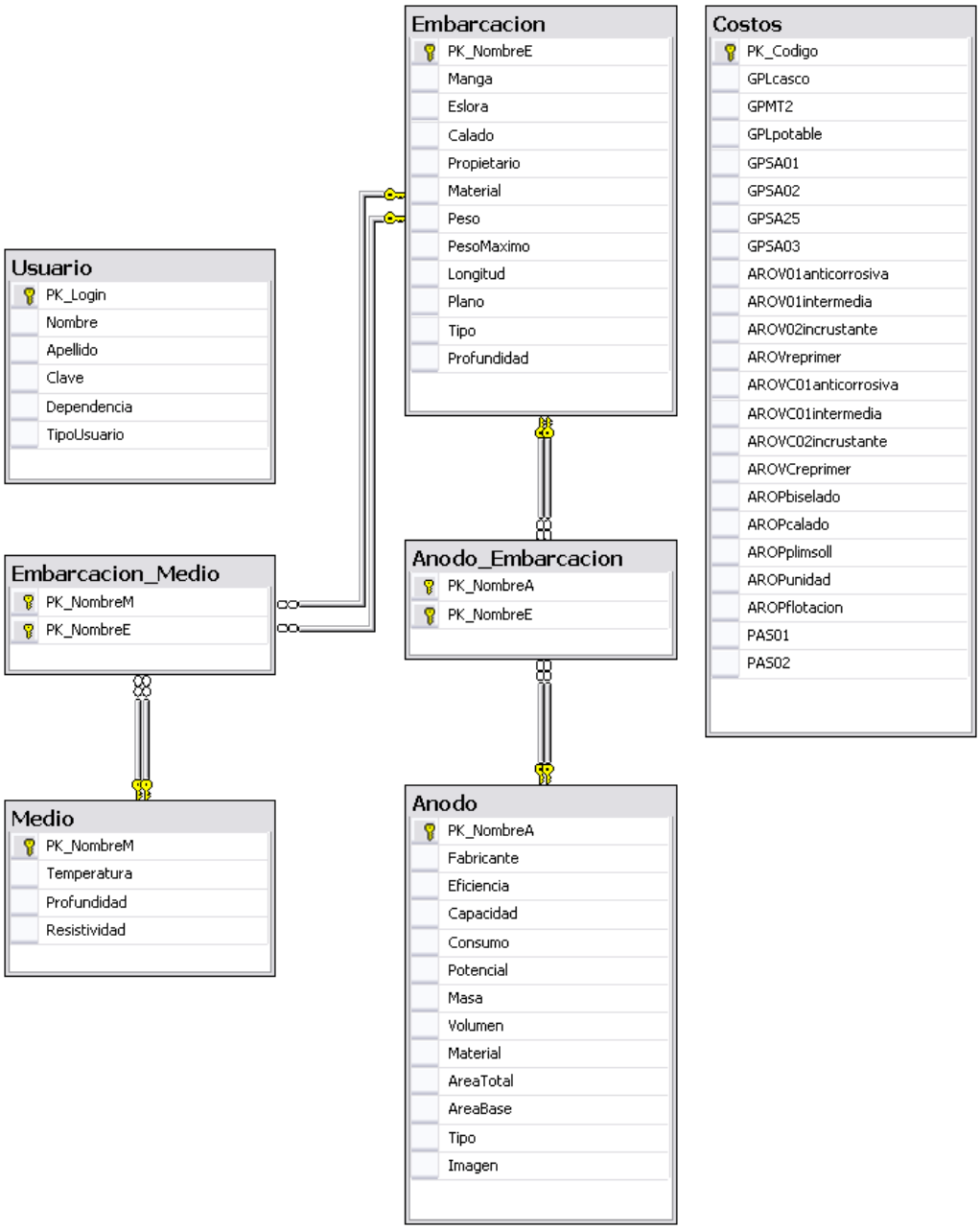


Imagen 4. Diagrama Visualización de información.

ANEXO B. BASE DE DATOS.

Descripción de la Base de Datos.

La base de datos esta creada en MS-SQLServer 2005 Express . A continuación se muestra el diagrama Entidad-Relación.



corporación para la investigación de la corrosión

Protek DS

Manual de Usuario

COTECMAR

MANUAL DE USUARIO PROTEK DS

PRE-REQUITOS TÉCNICOS

ESTRUCTURACIÓN

MENU

BARRA DE HERRAMIENTAS

INFORMACIÓN BASICA

MENSAJES DE ERRORES

PRE-REQUISITOS TÉCNICOS

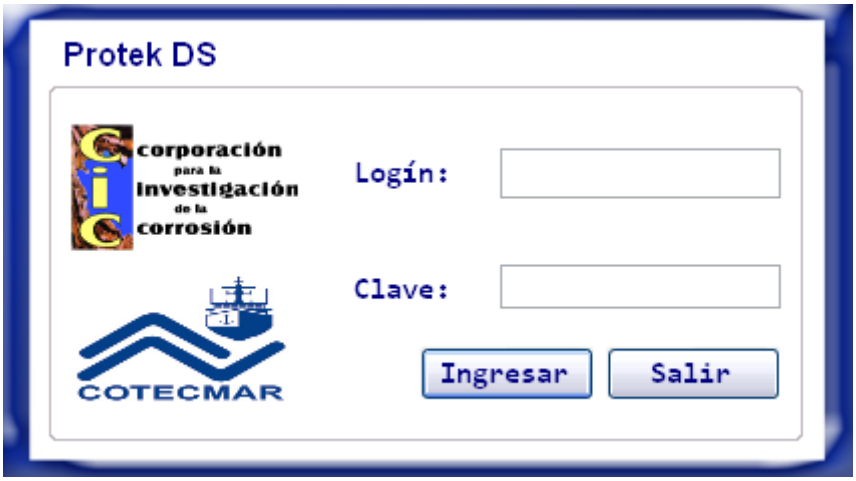
Para un óptimo desempeño de la herramienta software **PROTEK DS**, se necesitan algunos requerimientos de otras aplicaciones que deberán ser previamente instaladas, además de determinadas especificaciones de hardware del equipo en el cual se desea instalar esta herramienta. A continuación, se enumeran los requisitos necesarios software y hardware:

- SQL Server 2000 o SQL Express
- Windows XP.
- Procesador de 1.9 GHz o Superior.
- Memoria RAM mínima de 512 MB (se recomienda 1GB).
- La Resolución de pantalla óptima es 1280X1024.

ESTRUCTURACION

TIPOS DE USUARIOS

El Protek DS está estructurado para dos tipos de usuarios: 1. Usuario tipo Administrador con propiedades de control y 2. Usuario normal, sin propiedades de control. A continuación, se describe la pantalla Inicial de Acceso y luego se escribe cada una de las propiedades de los tipos de usuarios:



Pantalla Inicial de Acceso

LOGIN

El acceso al sistema del Protek DS se hace a través de esta pantalla, se debe digitar un Login y una Clave en cada uno de sus respectivos campos, oprimiendo a continuación el botón de ingresar. Es importante tener en cuenta que los usuarios no registrados no pueden ingresar al sistema. La información introducida

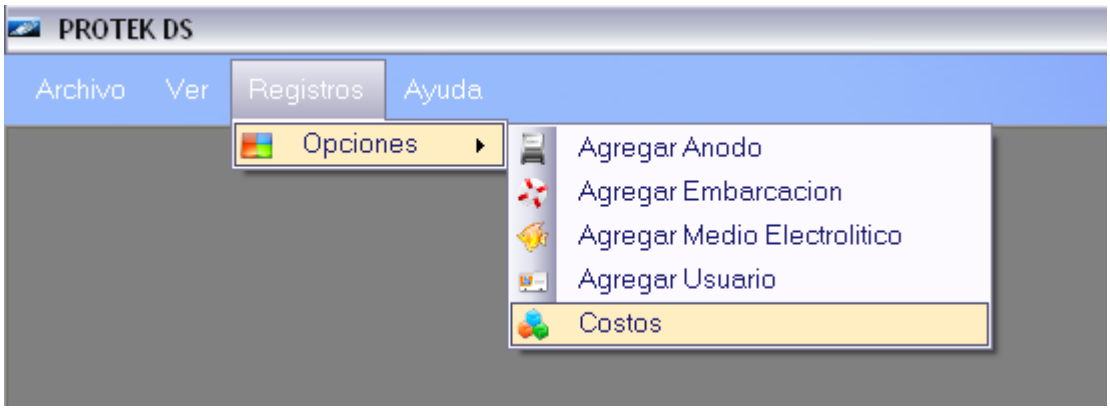
en este espacio es consultada en la base de datos y dado el caso de no encontrar el usuario, la herramienta le enviará un mensaje de error (en la sección **Mensajes de Error** puede encontrar la imagen de este error y los motivos que lo causan).

USUARIO ADMINISTRADOR

Cuando este tipo de usuario accede al sistema principal, en el menú superior se habilita una pestaña con el nombre de Registros, en este panel el usuario tiene permiso para manejar la Base de Datos del PROTEK DS. Las imágenes muestran donde esta ubicado en panel en el menú superior:

Menú Superior

Cuando se activa el panel de registros, se muestra la pestaña de Opciones:



Pestaña de Opciones

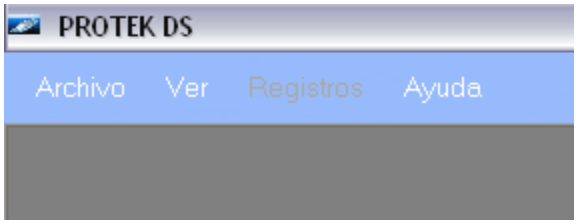
En la Sección de Menú superior se explica cómo utilizar este panel. Las facultades de un usuario administrador son las siguientes:

- Agregar Registros
- Modificar Registros
- Eliminar registros
- Consultar Registros

Cuando se habla de registros, se piensa en cada uno de los diferentes campos que conforman la base de datos, los cuales se muestran en la imagen anterior al activar la pestaña de opciones. Esto permite utilizar el software con todas las opciones activas.

USUARIO NORMAL/DISEÑADOR

Cuando un usuario normal entra al sistema sólo puede utilizar la barra de herramientas inferior y determinadas pestañas de Menú superior. El panel de Registros no está habilitado para este tipo de usuario, solamente utiliza la información previamente almacenada y en algunas ocasiones puede digitar información necesaria para realizar la simulación.



Panel No Habilitado.

En las siguientes secciones se muestra la forma de utilizar el Protek DS.

MENU PRINCIPAL

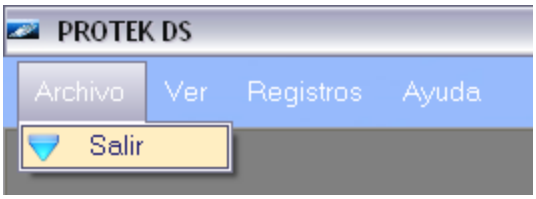
El menú principal o superior controla determinados eventos de carácter informativo del Protek DS, además de las funciones de registro, que sólo se encuentran activas para los usuarios con propiedades de administrador. Posteriormente, se explica de forma detallada cada uno de los paneles del menú y la función que cumplen.

Vista del Menú Superior

PANEL ARCHIVO

Salir

Esta opción cierra la programa, también se puede cerrar con el botón cerrar de la ventana de Windows.



Opción Salir

PANEL VER

Este panel controla el evento de ocultar o mostrar la barra de herramientas, la imagen contigua muestra su ubicación.

Panel Ver

Cuando la pestaña se encuentra activa se indica que en la parte inferior de la pantalla principal está activa la barra de herramientas, como sigue:

Barra de Herramientas

Cuando la pestaña no está activa, la barra de Herramientas desaparece quedando todo en un fondo gris. Para mostrar nuevamente el panel es necesario activar la pestaña del panel Ver en la opción Barra de Herramientas.

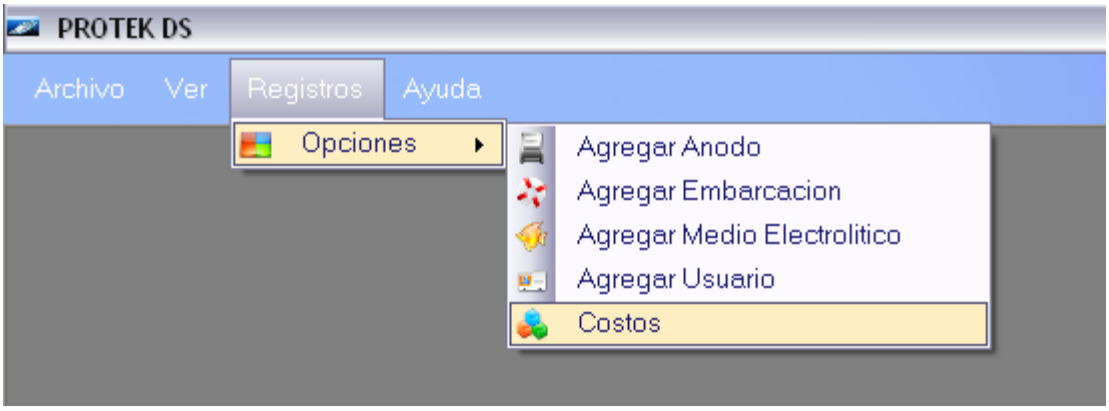
Opción Barra de Herramientas Deshabilitada

PANEL REGISTRO

Este panel contiene una pestaña de opciones que muestra al usuario administrador, permitiéndole acceder a ventanas en las cuales se pueden modificar los registros almacenados en la base de datos del PROTEK DS. A continuación, se muestra la operatividad de estas opciones, así mismo se explicará el procedimiento para realizar cada una de las acciones.

Panel Registro

Las nuevas pestañas que se activan al seleccionar la pestaña de opciones son las siguientes:

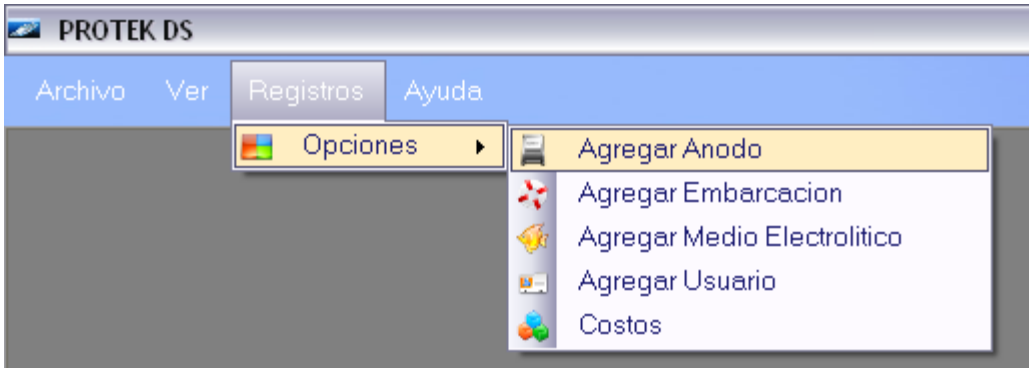


Pestaña de Opciones

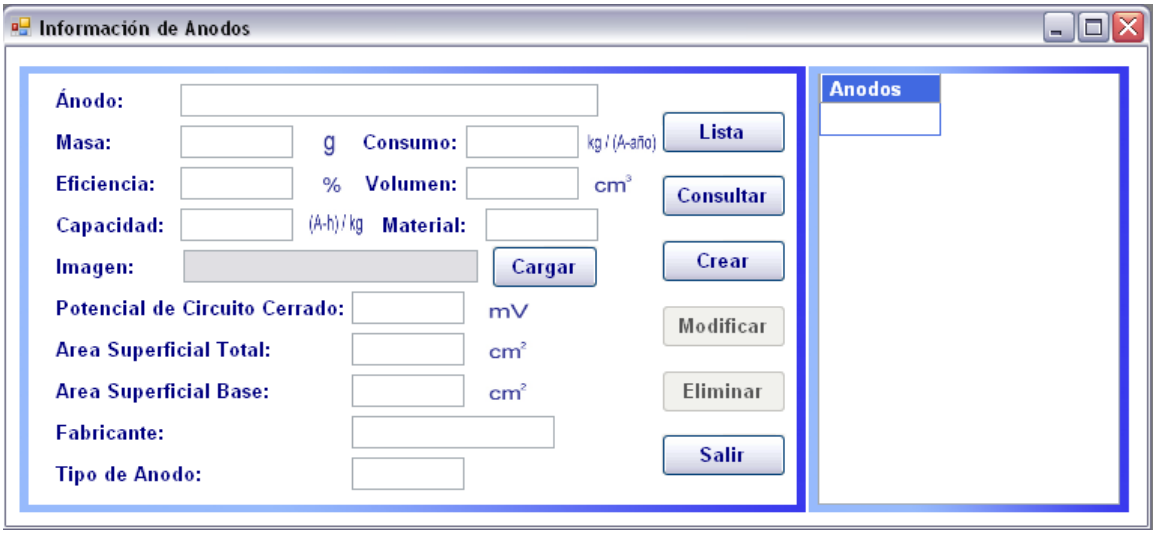
Cuando alguna de estas nuevas opciones es seleccionada aparecerá una nueva ventana que controlan los eventos que comunican con la Base de Datos. De este punto hacia delante, se muestra cómo se realizan las diferentes acciones de agregar, modificar, consultar y eliminar los registros que están almacenados.

AGREGAR INFORMACIÓN EN LOS REGISTROS

Para efectos de ejemplo se mostrará sólo la opción generada para el tratamiento de la información de los ánodos, el procedimiento es el mismo para las otras opciones de Embarcación, Medio electrolítico, costos y Usuario. Cuando seleccionamos esta opción, aparece una ventana que permite controlar los registros de los Ánodos.



Selección de Agregar Ánodo



Registro de Ánodo

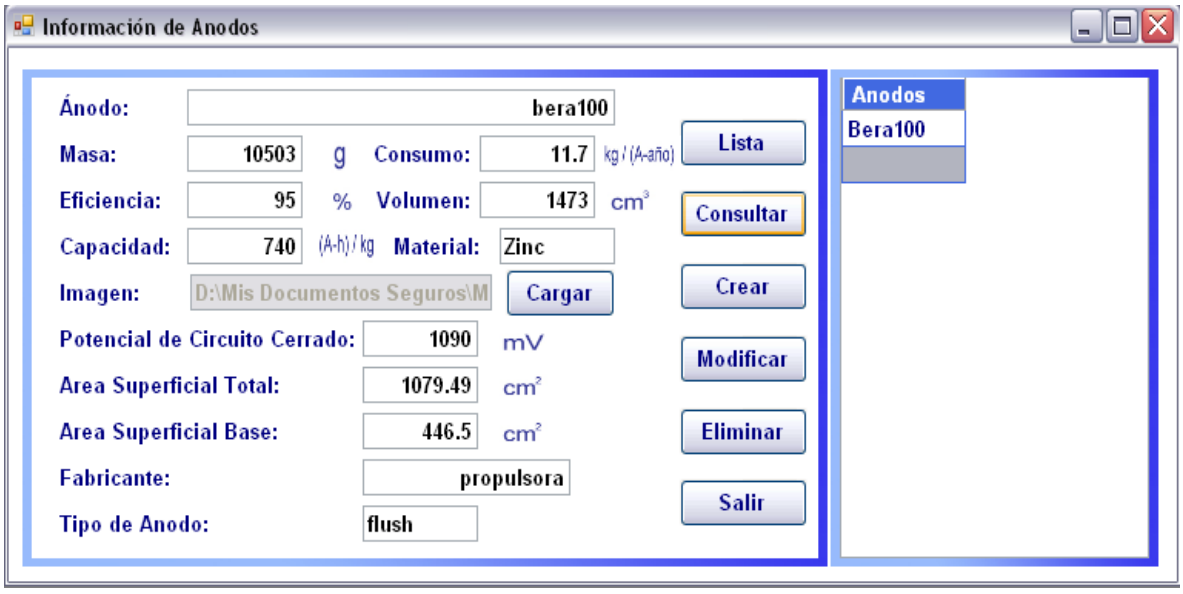
Esta nueva ventana tiene las opciones de consultar, crear, modificar y eliminar cada uno de los registros que están almacenados en la Base de Datos, además se encuentra la opción de lista, que nos muestra todos los archivos creados en esta sección, a manera de consulta general.

La forma correcta de utilizar esta ventana mostrada en la figura anterior es, en comienzo, la opción de consultar, esto quiere decir que primero se hará una consulta para saber si la información que se quiere manipular existe o no, en la

Base de Datos. Si la información solicitada se encuentra almacenada, la información en todos los campos se observará en la pantalla, activando las todas las opciones restantes. Con ello, se permite el total manejo del registro.

Consultar – Registro

En el campo de Ánodo se debe escribir el nombre del ánodo que se quiere consultar y a continuación se oprime el botón consultar, si el registro se ha realizado previamente, entonces la información aparece y las demás opciones de control se activan, caso contrario aparece un mensaje de error que muestra que el registro solicitado no se encontró y luego se activa la opción de crear.

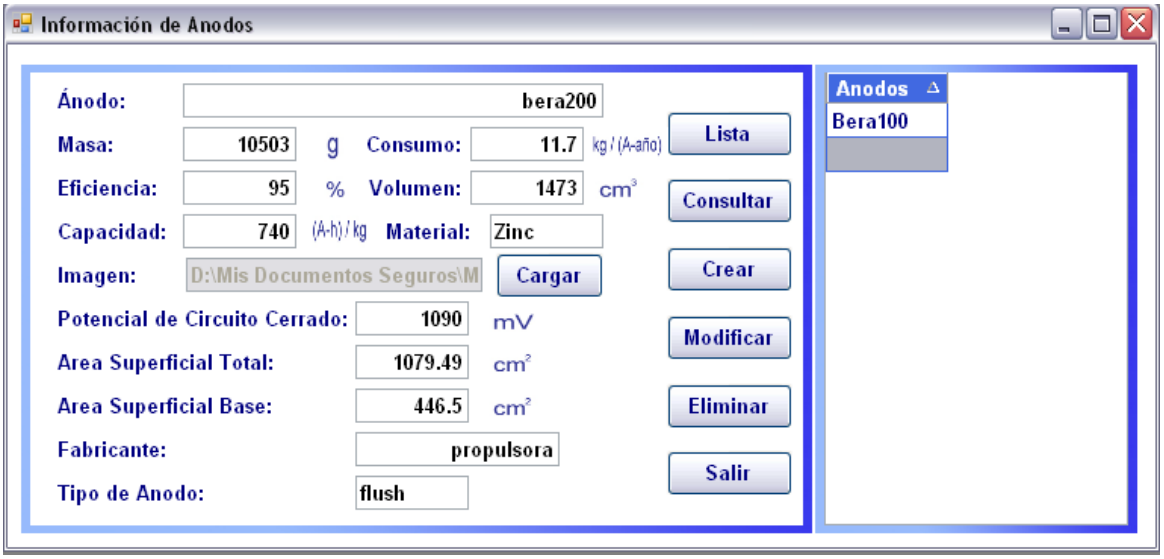


Consulta Realizada con Éxito Cargada

Si el registro no aparece el mensaje se muestra y activa la opción de crear:

Crear - Registro

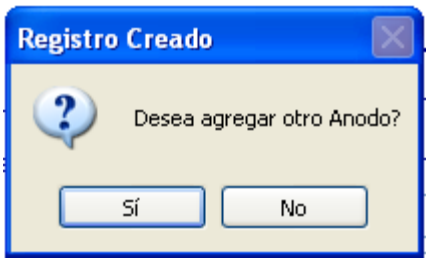
Una vez hecha una consulta fallida, se le permitirá llenar los campos del registro para luego oprimir el botón de crear y almacenar el nuevo registro.



Creando un Nuevo Registro

Se debe tener en cuenta que NO es posible crear un registro con el mismo nombre de un ánodo creado anteriormente, si esto no se tiene en cuenta el registro no se almacena y aparece un mensaje de error, desapareciendo la

información digitada. También, ocurre que si la información introducida no ha sido digitada en todos los campos, ésta no se almacena, generándose un mensaje de error que indica qué campo no está lleno para que el usuario complete el registro. Una vez completado el registro se oprime el botón crear y aparece un mensaje como el siguiente:



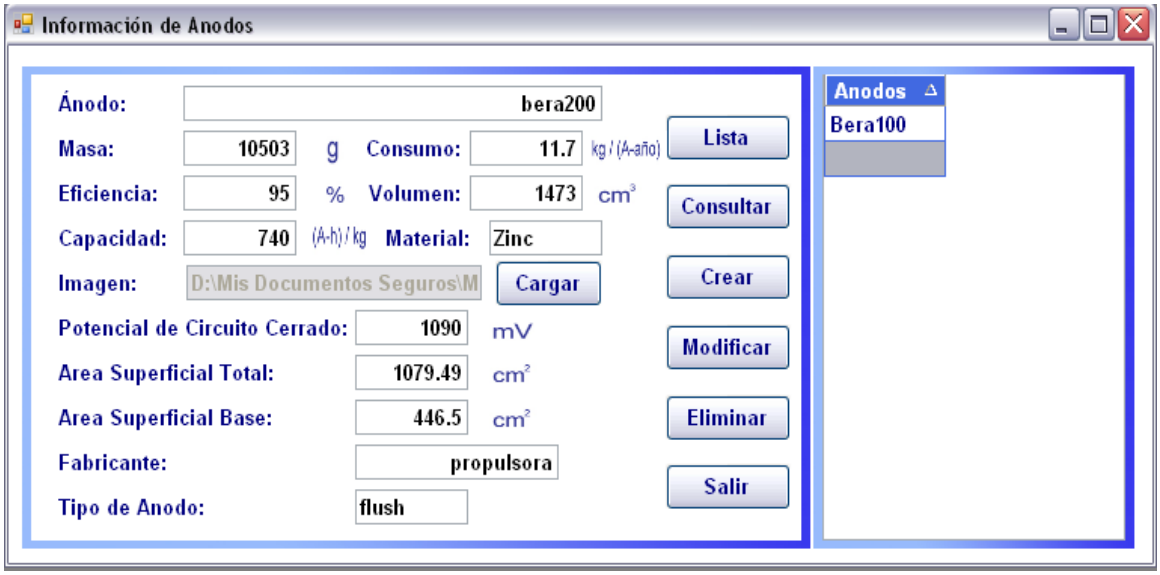
Registro Almacenado

También debe tenerse en cuenta que la información que se almacena debe estar en las unidades especificadas para que se garantice la consistencia de la solución, si esto no se tiene en cuenta el resultado puede ser inesperado. Si se desea agregar más información se elige la opción Sí para poder llenar otro registro. La información solicitada en los registros en su mayor parte se utiliza para hacer cálculos y operaciones, otra parte es solamente informativa.

Modificar – Registro

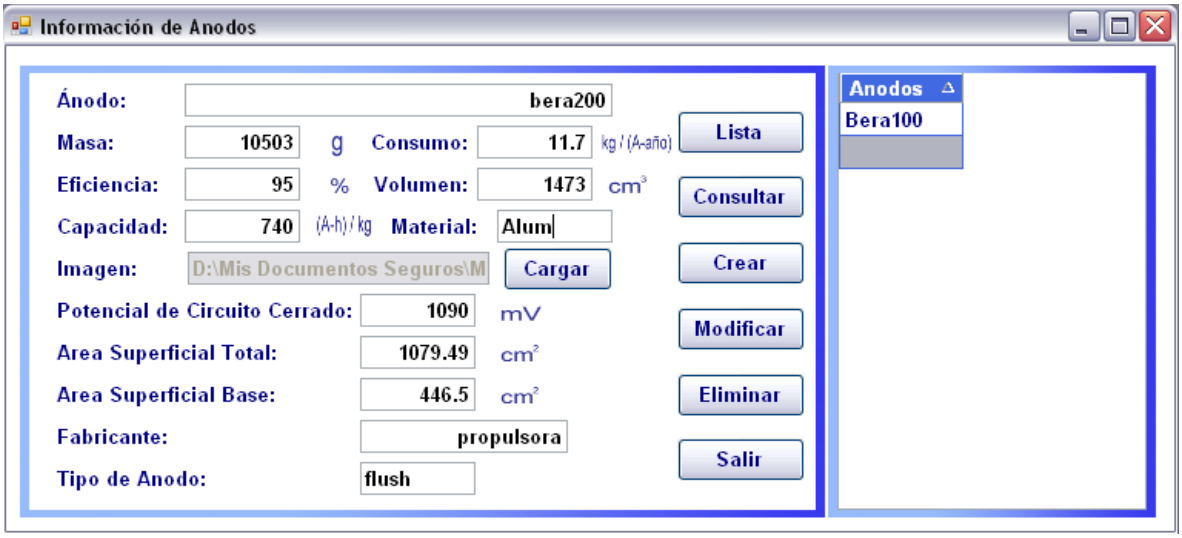
Para poder llevar a cabo la Modificación o Actualización de un registro de la Base de Datos, primero se debe hacer una consulta, constatando que el resultado de ésta sea la correcta, para que el registro cargue toda la información en cada uno de los campos. Luego de estar lleno, sobre el registro se puede modificar la información en todos los campos, excepto del campo del nombre, si esto se intenta modificar, aparece un mensaje de error, esto se explica en que sí se quiere cambiar un nombre, se puede estar hablando de un nuevo registro y NO de una

modificación. La imagen muestra cómo se actualiza un registro paso por paso. Primero la consulta:



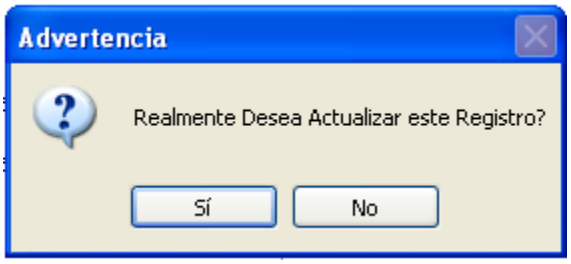
Consulta del Registro

Segundo, reescribir la información:



Modificando el Registro

Tercero, al oprimir el botón de modificar aparece un mensaje de advertencia y si la respuesta es SÍ, entonces muestra otro mensaje respuesta como sigue:



Mensaje de Advertencia

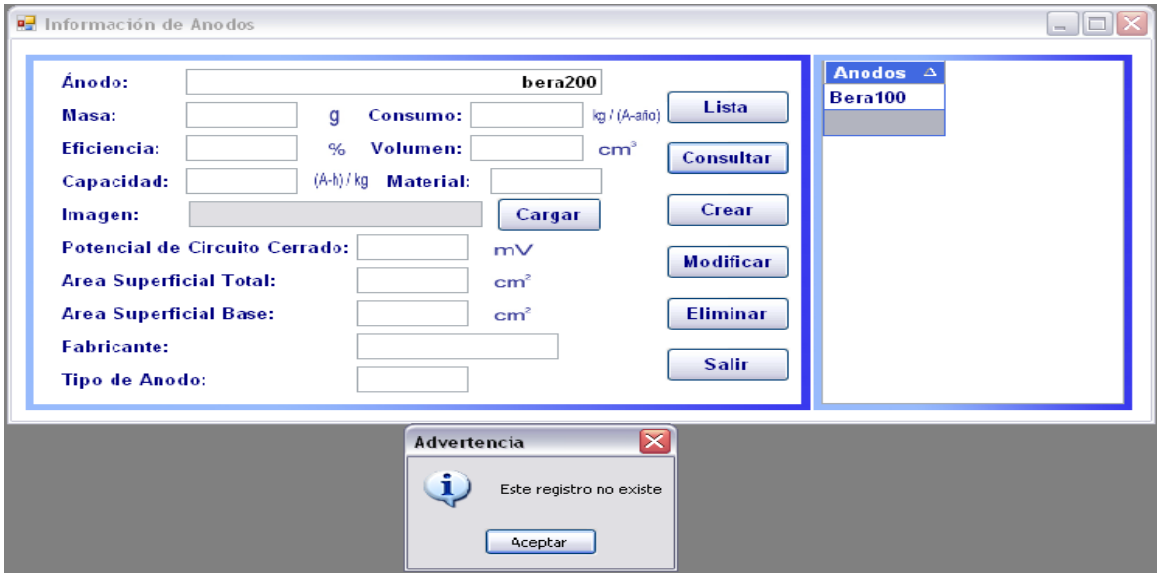
Registro Actualizado

La herramienta software entiende que ésta es una información delicada y, por lo tanto, pregunta si el usuario quiere actualizarla. Al desaparecer la anterior ventana, ésta se ubica en posición para realizar una nueva consulta.

Eliminar – Registros

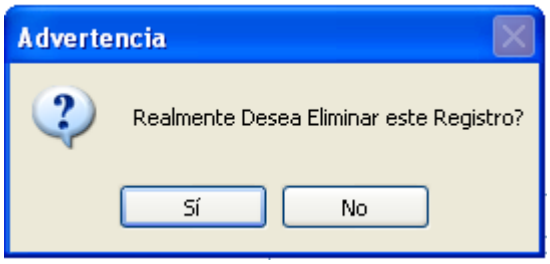
Al igual que la operación de modificar, la operación de eliminar también empieza haciendo una consulta en la Base de Datos de la información que se desea eliminar. Cuando el resultado de la consulta es satisfactorio y se llenan todos los campos del registro, aunque se puede escribir en el campo de nombre, al momento de ejecutar la acción de eliminar si el valor de este campo no es el valor de la consulta, simplemente el registro no se elimina, y aparece un mensaje como si el registro se eliminara. A continuación, se muestra paso a paso para eliminar un registro. Primero la consulta:

Consulta de Registro

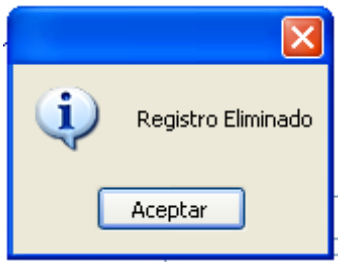


Escritura en el Campo del Registro

Segundo, oprimir el botón de eliminar, se muestra la ventana de seguridad y luego si la respuesta es SÍ entonces el registro se elimina.



Advertencia de Seguridad



Registro Eliminado

El botón de Salir como indica, sirve para tal fin, es decir cerrar, ya que no se puede ejecutar nada más, mientras esta opción esté activa. Con esta última operación se da por terminada las opciones del panel Registros. Como se indicó anteriormente, esta operación se repite para las otras opciones de usuario, embarcación y medio electrolítico.

PANEL DE AYUDA

Este panel permite acceder a la información de ayuda del PROTEK DS. En este panel se muestran dos opciones: 1. Opción de *Contenidos* donde se muestra la información contenida en este documento y 2. Opción *Acerca de*, que contiene la información sobre el uso y la versión actual del Software, la ubicación de este panel es la siguiente:

Panel de Ayuda

Contenidos

Cuando se selecciona la opción de contenidos, se despliega una página Web que contiene la información de Ayuda. A continuación, se muestra la pantalla inicial de un portal Web:

Parte central de la Pág. Web de ayuda

Acerca de

Cuándo se selecciona esta opción aparece una ventana con los créditos, donde se describe los derechos de utilización del PROTEK DS. La imagen que aparece es la siguiente:

Vista de Acerca de

BARRA DE HERRAMIENTAS

La barra de herramientas está compuesta de dos partes. La primera sirve de acceso directo a opciones del menú superior y la segunda se utiliza para cargar la información necesaria para modelar la protección catódica.

Primera Parte

Esta sección contiene opciones que permiten imprimir, realizar una vista preliminar, acceso a la ayuda, pero de una manera más rápida, como se muestra a continuación:

Accesos Directos

A partir de la forma de los iconos, se puede observar que cada uno de ellos es muy representativo. La opción de imprimir, ejecuta la acción de impresión del registro; la opción de Vista preliminar muestra el formato de impresión; y la opción de ayuda ejecuta el mismo comando que la pestaña de contenido que se encuentra en el panel Ayuda del menú superior.

Segunda Parte

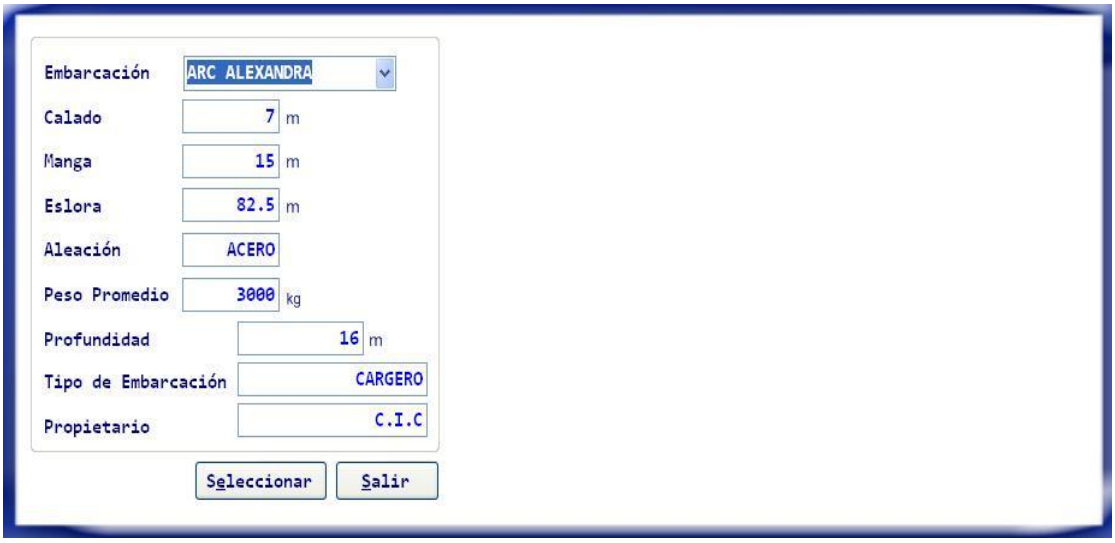
En esta sección se carga toda la información necesaria, para que el PROTEK DS pueda realizar la simulación de la distribución anódica en una embarcación. A continuación, se muestra una a una, las diferentes opciones y las acciones que realizan. La siguiente imagen representa la segunda parte del panel.

Opciones de Carga

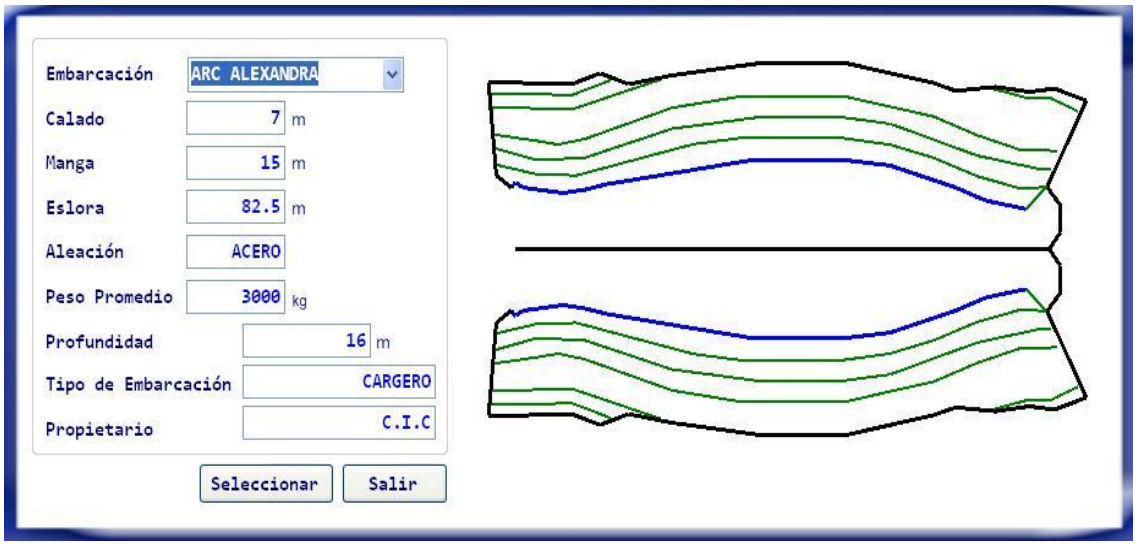
Selección de Embarcación

Esta opción está representada por un salvavidas de forma circular de colores blanco y rojo, cuando es seleccionada se despliega otro panel que permite elegir la embarcación a la cual se le hará una proceso de simulación de la distribución anódica que garantice un nivel de protección adecuada. La imagen y la ventana que se despliegan son las siguientes:

Selección de Embarcación



Ventana de Embarcación



Ventana de Embarcación

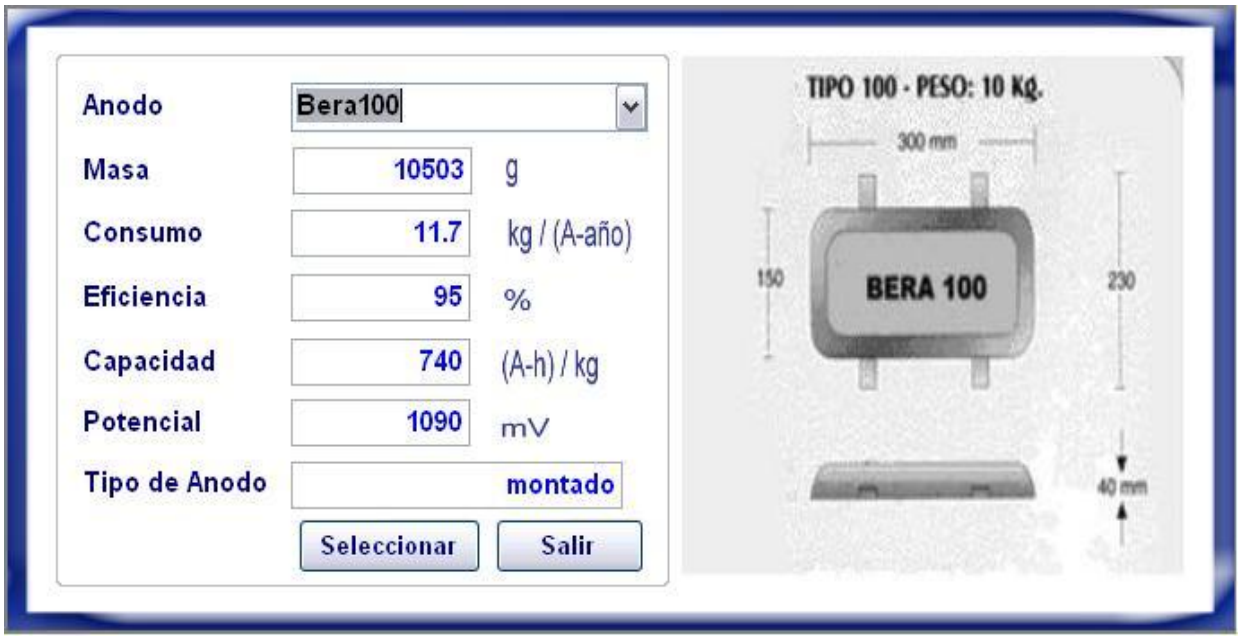
Cuando se selecciona una embarcación dentro del panel principal, se cargará la imagen de la embarcación, así como la información más representativa del navío. En importante tener en cuenta que es dinámica es decir que si realiza otras actividades mientras está seleccionando y la imagen del navío se borra, quiere decir que ha sido deseleccionada y, por lo tanto, la información no será cargada.

Cuando se ha elegido la embarcación, se oprime el botón de selección para guardar la información y salir de la ventana. El botón salir se utiliza para cerrar la ventana, pero no guarda ninguna información. Por defecto está cargado un registro.

Selección de Ánodo

Esta opción está representada por un ánodo de forma rectangular de color gris, cuando es seleccionada se despliega otro panel que permite elegir el ánodo con el cual se hará una distribución anódica por simulación. La imagen y la ventana que se despliegan son las siguientes:

Selección de Ánodo



Ventana de Ánodo

Cuando se selecciona un ánodo, dentro del panel principal, se cargará la imagen del ánodo, así como la información más representativa del mismo. Es importante tener en cuenta que esta opción es dinámica, es decir que si realiza otras actividades mientras está seleccionando, quiere decir que ha sido deseleccionada y, por lo tanto, la información no será cargada, debe desplegar el menú y seleccionarla. Cuando se ha elegido la embarcación, se oprime el botón de selección para guardar la información y salir de la ventana. El botón salir se utiliza para cerrar la ventana, pero no guarda ninguna información. Por defecto esta cargado un **registro**.

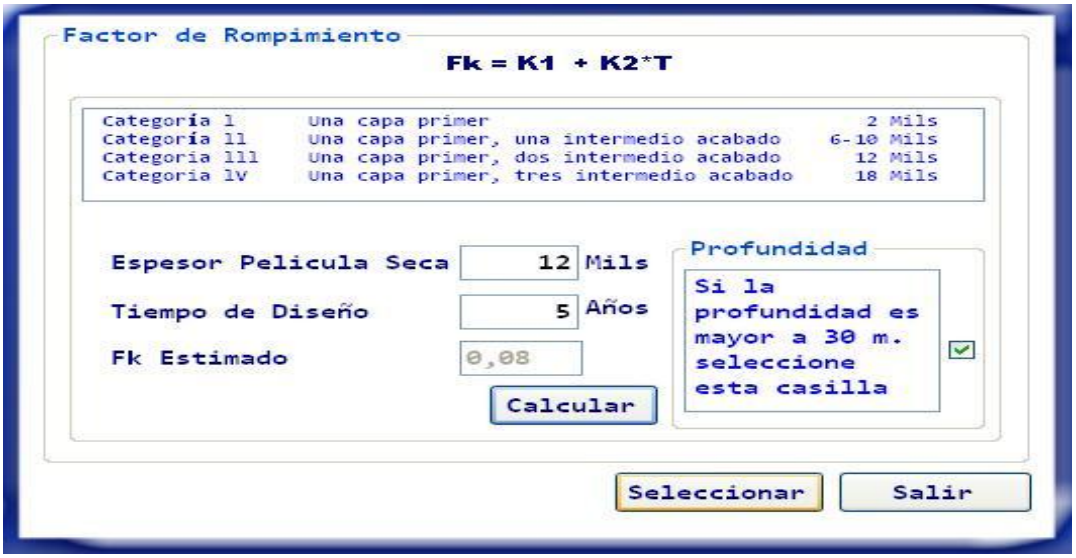
Selección de Recubrimiento

Esta opción está representada por una esfera de colores naranja, rojo y amarillo; cuando ésta es seleccionada se despliega otro panel que permite digitar la

información referente al recubrimiento con el fin de establecer un factor de rompimiento. La imagen y la ventana que se despliegan son las siguientes:

Selección de Recubrimiento

Una vez digitado el valor en Mils, de acuerdo al recuadro superior, el tiempo de diseño es de 5 años, éstos se necesitan para calcular el factor de Rompimiento. Este factor es un valor de esperanza utilizado para valorar la vida útil del recubrimiento que posee o poseerá la embarcación.



Factor de Rompimiento

Selección de Medio Electrolítico

Cuando se selecciona esta opción, se despliega una ventana en la cual se puede cargar la información referente al medio electrolítico, en otras palabras es la región en donde va ha trabajar la embarcación. Las imágenes siguientes muestran la ubicación de este panel y la ventana emergente de selección:

Selección de Medio Electrolítico

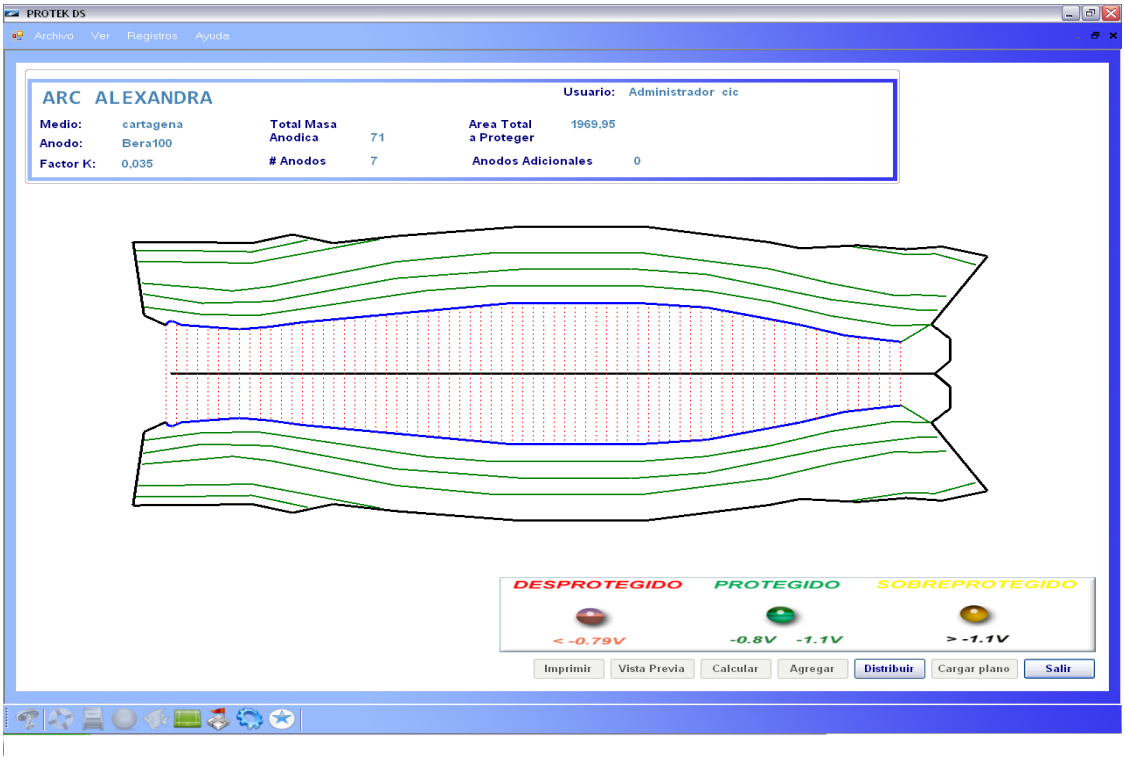
Ventana de Medio Electrolítico

Para seleccionar un medio se debe hacer dentro del panel Medio electrolítico. Cuando se selecciona, el registro se cargará automáticamente en los campos del registro con la información referente al medio escogido, luego se oprime el botón de seleccionar y se guarda en memoria para ser utilizada en el panel principal, al momento de calcular el número de ánodos. La información que aparece a un costado habla de unos valores de referencia utilizados en el ejemplo modelo.

Distribución de ánodos

Esta opción está representada por un tablero que tiene una bandera de color rojo y gris, cuando es seleccionada se despliega el panel principal en donde se cargara toda la información, que antes fue seleccionada en los otros paneles, se carga automáticamente, si por olvido no cargo una información, este emitirá en mensaje de error, advirtiéndole que la modelación no se puede realizar. La imagen y el panel que se despliega es el siguiente:

Distribución de Ánodos



Ventana Panel Principal

Cuando toda la información es cargada en los otros paneles, se puede modelar de manera satisfactoria, en la parte superior izquierda aparece una información referente a la información recogida en los anteriores paneles y se muestra los valores de números de ánodo, total de masa anódica, área total a proteger, si la información es cargada bien en los anteriores paneles, aquí se verifica, puesto que hay un campo por cada sección anterior que muestra algo de la información guardada. Esta imagen muestra este sector del panel principal:

Información del Panel Principal

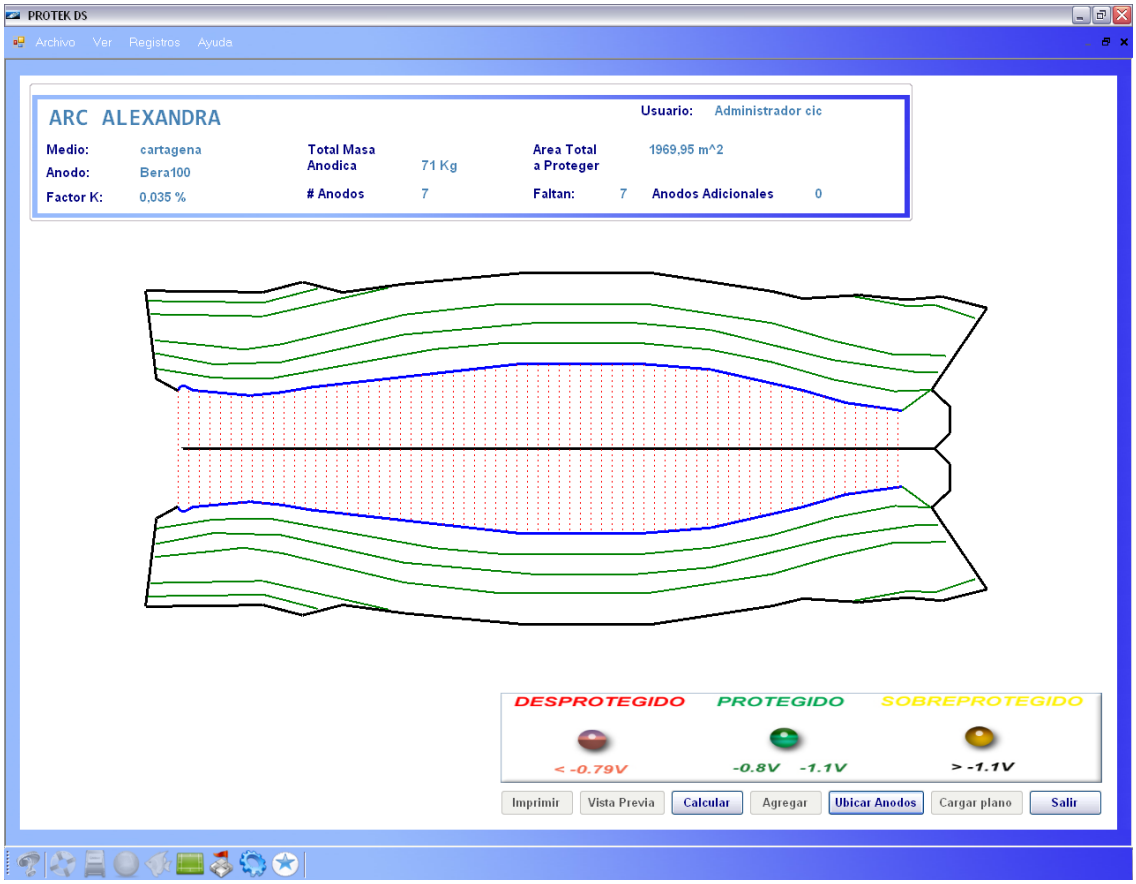
Cuando entramos en este panel se debe crear una malla que contiene los elementos finitos y que nos permitirá ver nuestro campo de acción, al igual que en panel de embarcación, solo cargara algunas líneas (las mas representativas para nuestro análisis), como son cubierta o casco, francobordo y línea de flotación. En la parte inferior derecha se encuentra una imagen con la escala de colores, que será una referencia al momento de interpretar los colores que aparecen dentro la línea de flotación ubicada en el mapa, y que por supuesto nos permite ver si nuestra embarcación se encuentra protegida con la cantidad de ánodos calculados o si por el contrario, lo hace con unos ánodos menos, esto debido al tiempo de diseño del sistema puesto que un ánodo se puede degradar en un tiempo menor al diseñado.

Luego de cargar el plano, debemos oprimir el botón de distribuir, para que grafique la distribución anódica, también se pueden agregar mas ánodos, esta opción se utiliza al oprimir el botón de agregar, al igual los ánodos de pueden mover al interior la imagen y por último está la opción de imprimir que imprime un mapa con la información del modelo cargado.

Distribución de ánodos Manuales

Esta opción está representada por un engranaje azul, cuando es seleccionada se despliega el panel principal en donde se cargara toda la información, que antes fue seleccionada en los otros paneles, se carga automáticamente, si por olvido no cargo una información, este emitirá en mensaje de error, advirtiéndole que la modelación no se puede realizar. La imagen y el panel que se despliega es el siguiente:

Distribución de Ánodos



Ventana Panel Principal

Cuando toda la información es cargada en los otros paneles, se puede modelar a manera satisfactoria, en la parte superior izquierda aparece una información referente a la información recogida en los anteriores paneles y se muestra los valores de números de ánodo, total de masa anódica, área total a proteger, si la información es cargada bien en los anteriores paneles, aquí se verifica, puesto que hay un campo por cada sección anterior que muestra algo de la información guardada. Esta imagen muestra este sector del panel principal:

Información del Panel Principal

Cuando entramos en este panel debemos en primera instancia, crear una malla que contiene los elementos finitos y que nos permitirá ver nuestro campo de acción, al igual que en panel de de ánodos automáticos, solo cargara algunas líneas. En la parte inferior derecha se encuentra una imagen con la escala de colores, que será una referencia al momento de interpretar los colores que aparecen dentro la línea de flotación ubicada en el mapa, una vez cargado el mapa se debe oprimir el botón de ubicar ánodos, para que de esta manera habilite la función del clic - Mouse, y así poder ubicar los ánodos.

Luego de cargar el plano, y ubicar los ánodos, también los ánodos mostrados se pueden mover o se pueden agregar más ánodos, luego seleccionamos la opción de calcular, para que grafique la distribución anódica, y por último esta la opción de imprimir, que imprime un mapa con la información del modelo cargado.

Caja de Mar

Esta opción está representada por un tablero de color verde, cuando es seleccionada se despliega el panel, en donde se cargara toda la información, que antes fue seleccionada en los otros paneles, esto con el fin de calcular el número de ánodos, si por olvido no cargo una información, este emitirá en mensaje de error, advirtiéndole que la modelación no se puede realizar. La imagen y el panel que se despliega es el siguiente:

Opción de Caja de Mar

Ventana de caja de Mar

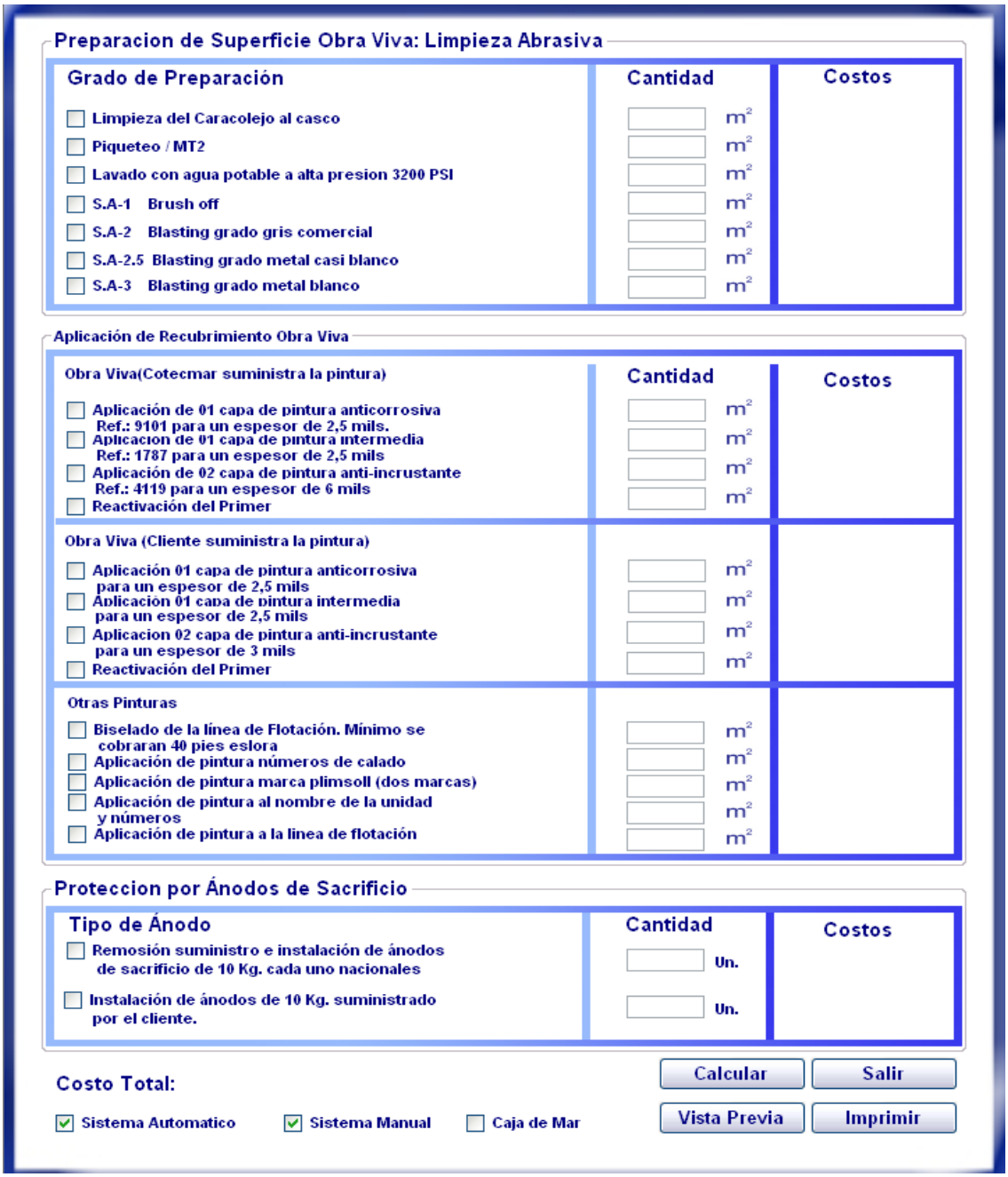
Para realizar el cálculo de número de ánodos, hay dos formas, dando un número de radio o número a diámetro, junto con la profundidad, esto para calcular el área total a proteger, y con esta área es posible calcular el número de ánodos ubicados al interior de la caja de mar.

Costos

Esta opción está representada por una estrella azul, cuando es seleccionada se despliega el panel, que antes fue seleccionada en los otros paneles, es decir habiendo ya seleccionado, algún sistema (manual o automático, y la caja de mar), esto con el fin de calcular el costo de mantenimiento e instalación de una

embarcación, si por olvido no cargo una información, este emitirá en mensaje de error, advirtiéndole que el cálculo no se puede realizar. La imagen y el panel que se despliega es el siguiente:

Costos



Ventana de Costos

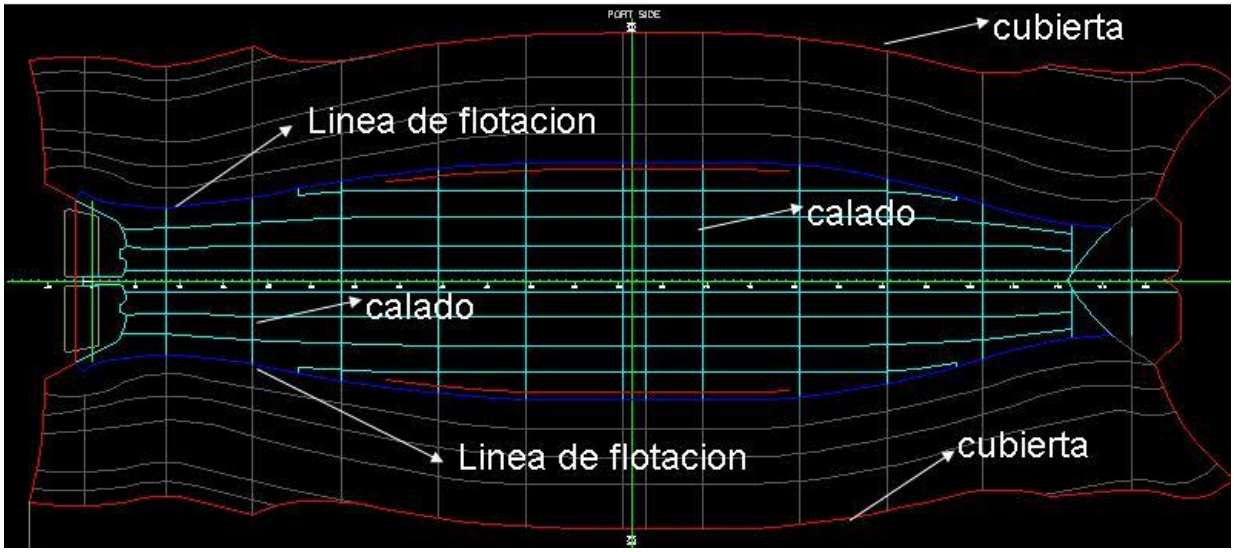
Una vez seleccionado algún sistema de distribución anódico, este panel permite digitar la cantidad de ánodos que se quieren utilizar, o los metros cuadrados de

preparación de superficie, o de aplicación de recubrimiento, aunque la cantidad no está sujeta a los valores calculados anteriormente, esto se debe a razones de ofrecer más ánodos, o más metros de preparación que pueda exigir un cliente.

INFORMACIÓN BÁSICA

Para que el Protek DS funcione correctamente se debe tener cierta información básica estructurada, ya que este ha sido un tema basado en referencias estandarizadas. También cabe notar que el Protek ha sido diseñado bajo una norma recomendada de buenas prácticas por la DNV, la norma utilizada es la DNV – RP 401 del año 1993, aunque existe una actualización de esta norma en el año de 2005, se consideró que esta no aplica para estructuras como las diseñadas para embarcaciones.

Como se mencionó en una sección anterior, para un coherente resultado del PROTEK DS se recomienda se tengan en cuenta las unidades de cada campo en los registros de la Base de Datos, puesto que se pueden generar respuestas erróneas por un mal dato, la principal molestia puede surgir con lo referente al plano y acerca de cómo el software lo interpreta, puesto que todos los planos de CAD, no cumple con esta especificación. A continuación, se muestra el esquema correcto de un plano para ser utilizado por el PROTEK DS.



Plano de CAD

También se debe tener en cuenta que se utiliza una distribución anódica de acuerdo a la sección del barco, ya que en algunos sitios el requerimiento de protección es mayor que en otros.

Las unidades de medida utilizadas en el software son las que corresponden a la norma ISO/IEC 80000, que recoge las unidades del conocido sistema internacional. A continuación, se ofrece un bosquejo de esas normas.

El **Sistema Internacional de Unidades**, conocido como **Sistema Internacional de Medidas**, es el nombre que recibe el sistema de unidades que se usa en la mayoría de los países, siendo la forma actual del sistema métrico decimal. La siguiente imagen muestra las unidades fundamentales de este sistema.

Magnitud física básica	Unidad básica	Símbolo	Observaciones
Longitud	metro	m	Se define en función de la velocidad de la luz
Tiempo	segundo	s	Se define en función del tiempo atómico
Masa	kilogramo	kg	Es la masa del «cilindro patrón» custodiado en Sevres (Francia).
Intensidad de corriente eléctrica	amperio o ampere	A	Se define a partir de la fuerza magnética
Temperatura	kelvin	K	Se define a partir de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.
Cantidad de sustancia	mol	mol	Véase también número de Avogadro
Intensidad luminosa	candela	cd	Véase también conceptos relacionados: lumen, lux e iluminación física

Sistema Métrico Decimal

A partir de estas se derivan otras magnitudes como múltiplos y submúltiplos, en la mayoría de las unidades, otras unidades derivadas de esta denominación hacen referencia a las unidades utilizadas para expresar magnitudes físicas que son resultado de combinar magnitudes físicas tomadas como básicas.

El concepto no debe confundirse con los múltiplos y submúltiplos, los que son utilizados tanto en las unidades básicas como en las unidades derivadas, sino que debe relacionarse siempre a las magnitudes que se expresan. Si estas son longitud, masa, tiempo, intensidad de corriente eléctrica, temperatura, cantidad de sustancia o intensidad luminosa, se trata de una magnitud básica, y todas las demás son derivadas, por ejemplo los grados Celsius, el Voltaje, Resistencia, etc.

Otra información importante se centrara en la instalación y el manejo del Motor de Bases de Datos - SQL, puesto que una mala conexión no permitirá que el software interactué con la información previamente almacenada. Para esto se establecerá en la base de datos un nombre de usuario y password que previamente se deberá establecer cuando se haga la respectiva Instalación.

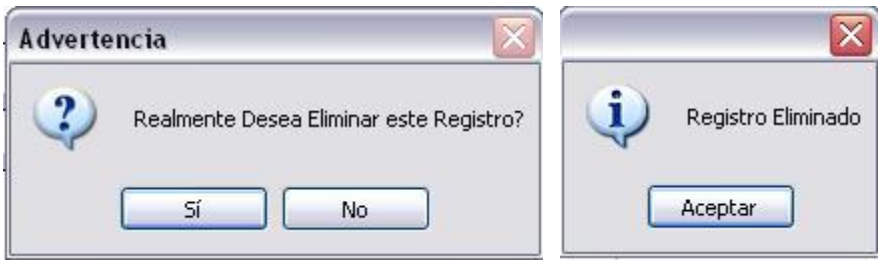
Mensajes de Error y Advertencias

Estos mensajes de error se encuentran en todos las secciones de software y son utilizados para informar acerca de una incorrecta utilización del software. También existen mensajes de advertencia, pero éstos no se tienen en cuenta para los párrafos siguientes. Los mensajes típicos están relacionados con el login para acceder al sistema y con la manipulación incorrecta de los archivos de la Base de Datos. Estos son los mensaje más comunes, aunque cada uno de ellos es detallado, algunos realmente se deben tener en cuenta, por eso están acompañados por mensajes de advertencia, las siguientes imágenes pertenecen a ellos.

Ventana de Login

Errores de Registro

Ventanas de Registros



Ventanas de Registros

Estos mensajes son iguales para el resto de las opciones de registro, las siguientes imágenes corresponden a errores en la barra de Herramientas.

Errores de Selección

El último de ellos es cuando no se carga la información de los paneles de información y el mensaje de no realizar la simulación de la distribución.

Error por no cargar toda la información de los paneles