

SISTEMA DE CÁLCULO DE PROTECCIÓN CATÓDICA DE LOS BUQUES CON MACROS EN EXCEL.

Primer Autor Montero Bueno J.A¹

Segundo Autor Díaz Cervantes L.M²

^{1,2} Centro de Investigación y Desarrollo Naval.

¹e-mail: monteroarturo917@gmail.com

RESUMEN

La protección catódica por ánodos de sacrificio, en conjunto con el uso de distintos esquemas de pintura es el método más utilizado para el control de la corrosión en los cascos de las embarcaciones.

Este trabajo brinda un sistema de cálculo de protección catódica de los buques, realizado con macros en Excel para una mejor interacción con el usuario, que le resulte fácil y operativo, teniendo en cuenta la gran cantidad de datos a introducir si se quiere realizar un cálculo a conciencia, que abarque las diferentes partes sumergidas de la embarcación que van a estar sometidas a la corrosión galvánica.

Se realizó un estudio de los métodos que existen para el cálculo de la protección catódica de los buques y se elaboró una metodología de cálculo, que comprende el cálculo de ánodos en el casco (bandas y fondo), ánodos en espejo de popa teniendo en cuenta el área de la hélice, ánodos en cajas de mar, ánodos en arbotantes y ánodos en palas de timón.

En este trabajo no se pretende tratar esta teoría de forma explícita, aunque se realizó un estudio de varias fuentes sobre el tema. Por lo que se muestra la implementación de un sistema de protección catódica con macros en Excel, que brindan una solución práctica a los profesionales del mar, para el cálculo y determinación de la cantidad de ánodos de sacrificio en las diferentes partes de la obra viva del buque, ya sea en el proceso de diseño o de explotación del buque.

Palabras claves: Sistema de protección catódica, ánodos de sacrificio, casco de buques, potencial electronegativo, densidad de corriente.

INTRODUCCIÓN

El sistema de protección catódica se implementa con el objetivo de hacer funcionar al casco del buque como un cátodo en una celda de corrosión, regulando ciertos factores electroquímicos, donde el ánodo galvánico o ánodo de sacrificio, conectado eléctricamente al casco del buque (parcialmente sumergido), descargará una corriente que fluirá a través del electrolito (en este caso el agua de mar) hasta el casco del buque, protegiendo su superficie. (Fig 1)

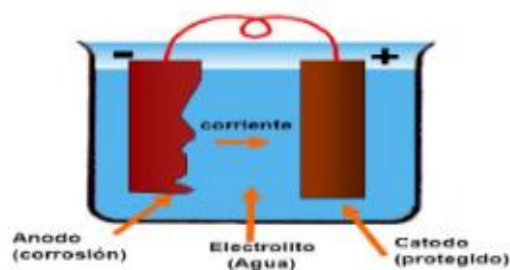


Fig 1. Proceso de corrosión en un electrolito.

Para garantizar una protección adecuada los ánodos deben cumplir con ciertos requerimientos, como: peso del ánodo, dimensiones, y forma geométrica. (Fig 2)



Fig 2. Ánodos de Zinc y Aluminio.

Se entiende por corrosión a la destrucción de un cuerpo sólido causada por un ataque espontáneo, de naturaleza química o electroquímica que se inicia en la superficie. (Fig 3)

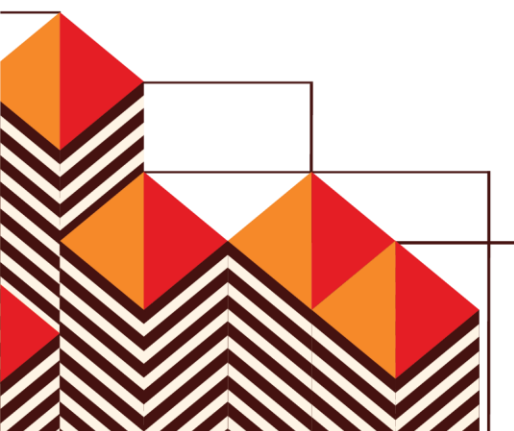




Fig 3. Corrosión del casco

Según la ubicación de los metales en la Serie Electroquímica, un metal será anódico con relación a otro, y al mismo tiempo será catódico respecto a otro metal, en dependencia de su potencial electronegativo, y por ende de la ubicación que tenga en la tabla. Por ejemplo, según la figura 4, el Hierro será catódico con respecto al aluminio por encontrarse por debajo de éste y al mismo tiempo será anódico con respecto al Cobre por encontrarse por encima de este otro. Esto evidentemente responde a la diferencia de potencial que existe entre ellos.

Bajo este concepto, el metal con potencial más electronegativo, actúa como ánodo y se sacrifica con respecto al otro metal menos electronegativo que actúa como cátodo, y es protegido por el ánodo. Es por eso, que a este sistema se le conoce con el nombre de protección catódica por ánodos de sacrificio.

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

Fig 4. Serie electroquímica de los metales.

En la fig 5 se muestra el principio bajo el cual funciona este sistema de protección.

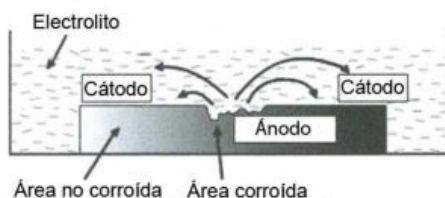


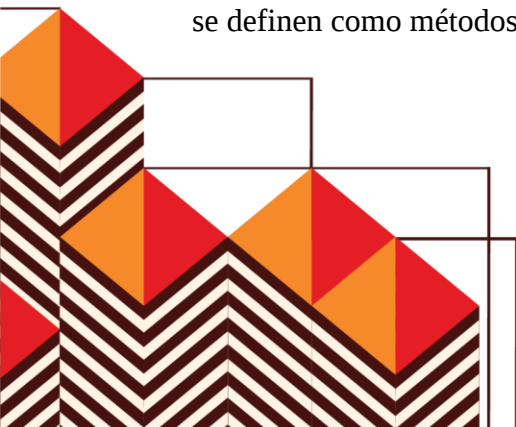
Fig 5. Celda electroquímica.

El problema de la corrosión afecta a la totalidad de la flota mundial y ocasiona pérdidas considerables al casco del buque y su rendimiento, disminuyendo su velocidad y resistencia estructural. Es por esto, que se hace necesario derogar importantes sumas de dinero para combatir la corrosión y revertir en lo posible este fenómeno.

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

1. Debe tener un potencial más electronegativo como ánodo, que el del metal a proteger.
2. El potencial electronegativo del ánodo de sacrificio no puede exceder en mucho al del metal a proteger, ya que se disminuye considerablemente el tiempo de vida útil del ánodo.
3. Debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, es decir no debe desarrollar películas pasivantes protectoras y debe tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
4. El metal debe tener un elevado rendimiento eléctrico, expresando en A/h kg, lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente (consumo de corriente).
5. La disolución del ánodo debe ser uniforme.
6. El metal debe ser de fácil adquisición y deberá de poderse fundir en diferentes formas y tamaños.
7. El metal deberá tener un costo razonable, de modo que, en conjunción con las características electroquímicas correctas, pueda lograrse una protección a un costo bajo por ampere – año.

Sobre el tema de la corrosión y la forma de protección de los buques se ha escrito mucho, donde se definen como métodos fundamentales de protección catódica:



1. Por ánodos de sacrificio: donde existe por conexión directa, un par eléctrico entre el acero y un metal menos noble que él (ánodo).
 2. Por corriente impresa: donde se utiliza corriente eléctrica proveniente de un generador externo.
- El objetivo de este trabajo es la implementación de un sistema de cálculo de protección catódica por ánodos de sacrificio, a través de macros de Excel, para facilitar el trabajo del profesional marítimo en el cálculo de los ánodos del buque.

2- MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 ANTECEDENTES

Los cálculos de protección catódica de los buques se realizan por el ingeniero naval de forma esporádica, por diseño de una nueva embarcación, o por reposición de ellos antes de una varada a solicitud del cliente.

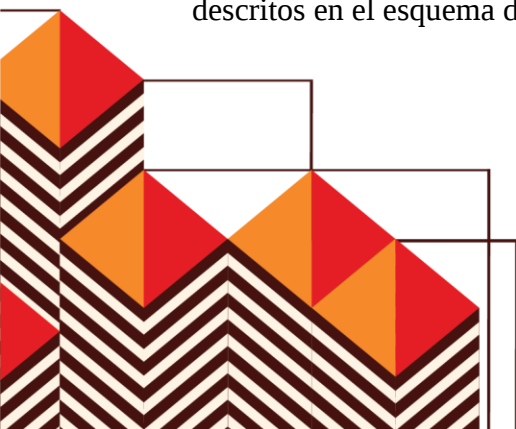
Existen procedimientos de cálculo que dan resultados diversos, y en ocasiones resultan muy aproximados en dependencia de las variables a introducir, o la simplicidad de sus formulaciones.

En nuestro caso en particular, no existe una metodología para el cálculo de la protección catódica que nos brinde una respuesta inmediata para la solución de este problema. Es por ende, que nos damos a la tarea de crear un sistema de cálculo de protección catódica con macros en Excel, donde el operador solo debe introducir los valores de entrada del buque, y el material del ánodo a utilizar, para lo cual el sistema escoge por defecto los parámetros de cálculo y realiza de forma inmediata el cálculo, dando la solución de ánodos necesarios para cada parte sumergida de la embarcación.

2.2 MODELO MATEMÁTICO.

2.2.1 Esquema de cálculo.

Para calcular el número de ánodos mínimo en una embarcación es necesario cumplir con los pasos descritos en el esquema de la figura 6.



En esta figura se muestra el esquema de cálculo completo para la determinación de la cantidad mínima de ánodos. Este cálculo arroja la cantidad específica en el casco (banda y fondo), la cantidad en las cajas de mar, la cantidad en las palas de los timones y la cantidad en los arbotantes, así como brinda la vida útil de los ánodos y el espaciamiento para su ubicación en el casco.

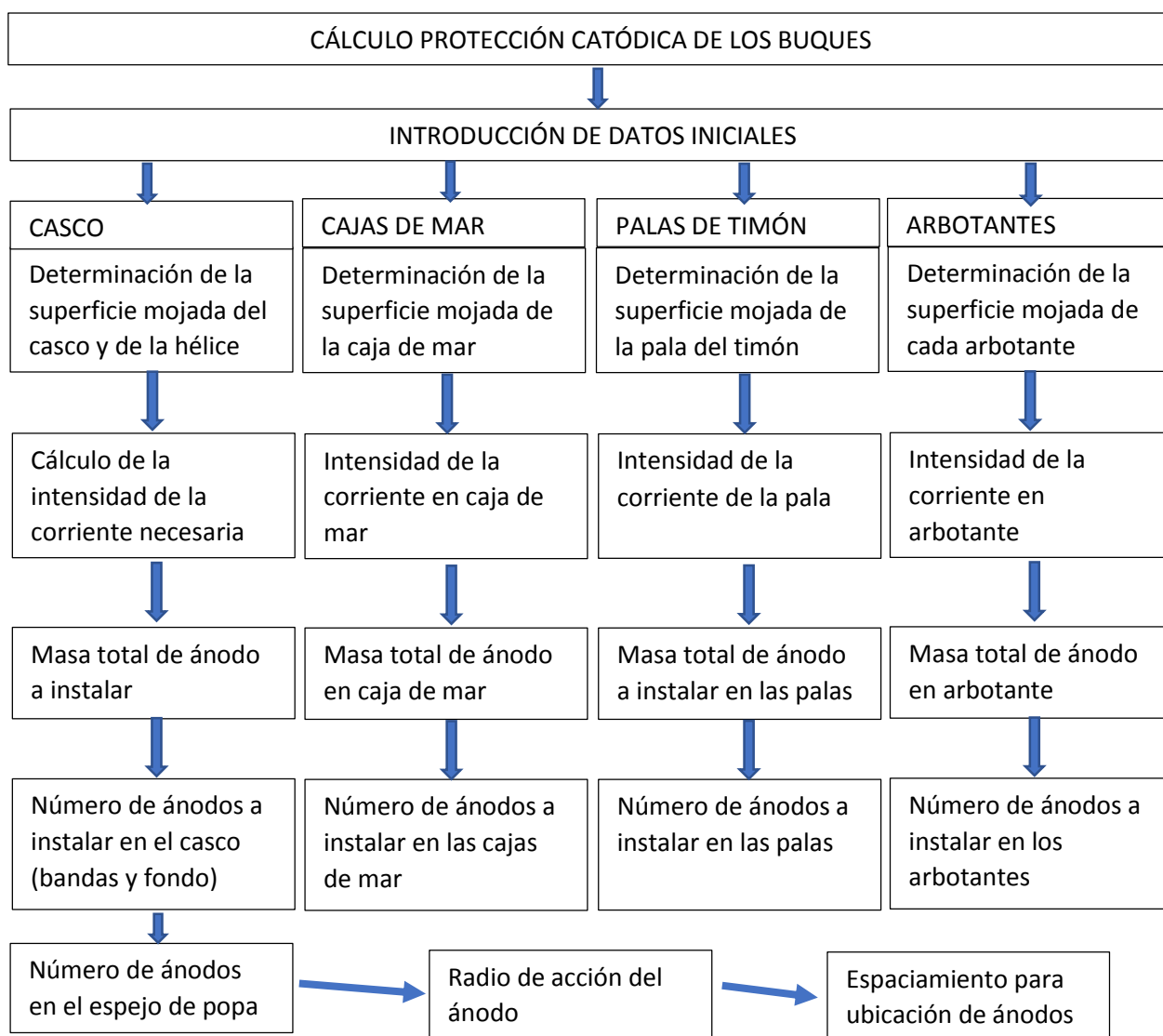


Fig 6. Esquema de cálculo de protección catódica.

2.2.2 Formulación matemática.

Para la elaboración del modelo matemático se acopiaron diversas fuentes, donde se conformó la variante más completa de cálculo, de forma tal que abarcara las diversas partes de la superficie sumergida del buque.

El modelo matemático fue implementado en una hoja de Excel y las fórmulas que responden a esto son las siguientes:

1. Cálculo del área de la superficie mojada.

$$S_{mc} = (1.8 * L_{pp} * D) + (B * L_{pp} * B) \quad (1)$$

Donde:

S_{mc} – Superficie mojada del casco, m^2

L_{pp} – Eslora entre perpendiculares, m

D – Calado, m

B_c – Coeficiente de bloque.

B – Manga de trazado, m

2. Intensidad de la corriente total.

$$I_t = (S_{mc} * DC_c * f_{drf}) + (S_{mh} * DC_h) \quad (2)$$

Donde:

I_t – Intensidad de corriente total, A

DC_c – Densidad de corriente del casco, mA/m^2

f_{drf} – Factor de deterioro de recubrimiento final

S_{mh} – Superficie mojada de la hélice, m^2

$$S_{mh} = \pi * r^2 * 1.1777786 * 2$$

r – Radio de la hélice, m



El factor de deterioro del recubrimiento f_{drf} , describe la reducción de la corriente de protección necesaria debida a la aplicación de un recubrimiento electricamente aislado.[1]

$$f_{drf} = a + b * t \quad (3)$$

Donde:

a, b – Constantes que dependen de las categorías del recubrimiento.

t – vida de diseño del sistema de protección catódica, años.

Categoría I: una capa de pintura epoxi, con un espesor de capa seca mínimo de 20 μm .

Categoría II: una o más capas de pintura marina base epoxi, poliuretano o vinilo con un espesor mínimo de la capa seca de 250 μm .

Categoría III: dos o más capas de pintura base epoxi, poliuretano o vinilo con un espesor mínimo de la capa seca de 350 μm .

Las constantes a y b pueden tener los valores reflejados en la tabla 2.

Tabla 2. Constantes recomendadas de a y b para el cálculo del factor de deterioro de la pintura.

Profundidad (m)	Valores recomendados de a y b según categorías I, II y III.		
	I (a=0.10)	II (a=0.05)	III (a=0.02)
0-30	b=0.10	b=0.025	b=0.012
>30	b=0.05	b=0.015	b=0.008

3. Intensidad de la corriente total por año

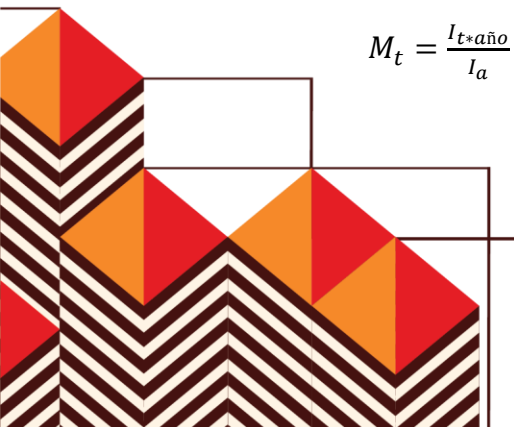
$$I_{t*año} = I_t * 365 * 24 * t \quad (4)$$

Donde:

$I_{t*año}$ – Intensidad de la corriente total por años, Ah

4. Masa de ánodo a instalar.

$$M_t = \frac{I_{t*año}}{I_a} \quad (5)$$



Donde:

M_t – Masa total de ánodo a instalar, Kg

I_a – Capacidad eléctrica teórica del ánodo, Ah/Kg

5. Masa real de ánodo a instalar.

$$M_r = \frac{I_t * a_{\text{ño}}}{R_a * F_u} \quad (6)$$

Donde:

M_r – Masa real del ánodo, Kg

R_a – Rendimiento del ánodo.

F_u – Factor de utilización.

6. Número de ánodos a instalar.

$$N_a = \frac{M_r}{P_{ac}} \quad (7)$$

Donde:

N_a – Número de ánodos, u

P_{ac} – Peso del ánodo en el casco, Kg

7. Superficie mojada de la caja de mar.

$$S_{mcm} = (a * p) + 4(h * p) \quad (8)$$

Donde:

S_{mcm} – Superficie mojada de caja de mar, m^2

a – Ancho caja de mar, m

p – Profundidad caja de mar, m

h – Altura caja de mar, m



8. Intensidad de corriente total caja de mar.

$$I_{tcm} = S_{mcm} * DC_{cm} * f_{drf} \quad (9)$$

Donde:

I_{tcm} – Intensidad de corriente total caja de mar, A

DC_{cm} – Densidad de corriente caja de mar, mA/m²

9. Intensidad de corriente total gastada por año en caja de mar.

$$I_{t,año,cm} = I_{tcm} * 365 * 24 * t \quad (10)$$

Donde:

$I_{t,año,cm}$ – Intensidad de corriente total gastada por año en caja de mar, A

10. Masa del ánodo a instalar en cajas de mar.

$$M_{tcm} = \frac{I_{t,año,cm}}{I_a * R_a * F_u} \quad (11)$$

Donde:

M_{tcm} – Masa total del ánodo en cajas de mar, Kg

11. Cantidad de ánodos a instalar en cajas de mar.

$$C_{acm} = \left(\frac{M_{tcm}}{P_{acm}} \right) * ncm \quad (12)$$

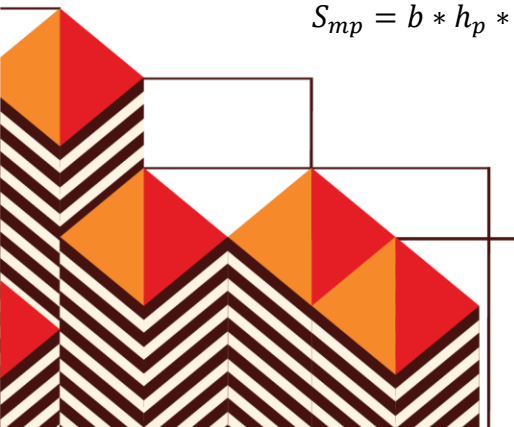
Donde:

P_{acm} – Peso de cada ánodo en cajas de mar, Kg

ncm – Cantidad de cajas de mar, u

12. Superficie mojada de la pala del timón.

$$S_{mp} = b * h_p * 2 \quad (13)$$



Donde:

S_{mp} – Superficie mojada de la pala del timón, m^2

b – Ancho de la pala, m

h_p – Altura de la pala, m

13. Intensidad de corriente total de la pala.

$$I_{tp} = S_{mp} * DC_p * f_{drf} \quad (14)$$

Donde:

I_{tp} – Intensidad de la corriente total de la pala, A

DC_p – Densidad de corriente de la pala, mA/m^2

14. Intensidad de la corriente total de la pala por años.

$$I_{tp,años} = I_{tp} * 365 * 24 * t \quad (15)$$

Donde:

$I_{tp,años}$ – Intensidad de la corriente total de la pala por años, (Ah)

15. Masa total del ánodo de las palas.

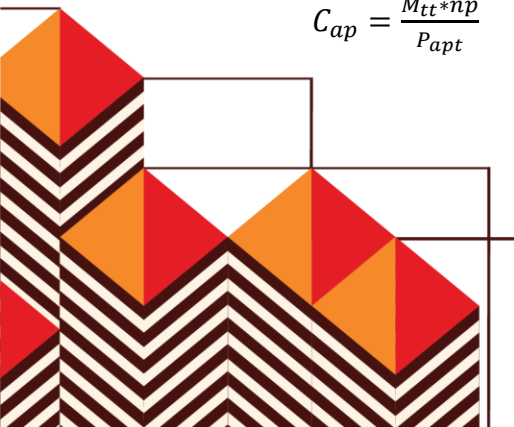
$$M_{tt} = \frac{I_{tp,años}}{I_a * R_a * F_u} \quad (16)$$

Donde:

M_{tt} – Masa total del ánodo de las palas, Kg

16. Cantidad total de ánodos en las palas.

$$C_{ap} = \frac{M_{tt} * n_p}{P_{apt}} \quad (17)$$



Donde:

np – Cantidad de palas de timón, u

P_{apt} – Peso de cada ánodo en las palas del timón, Kg

17. Superficie mojada de cada arbotante.

$$S_{ma} = b_a * h_a * 2 * npa + S_{mn} \quad (18)$$

Donde:

S_{ma} – Superficie mojada de cada arbotante, m^2

b_a – Ancho de pata de arbotante, m.

h_a – Altura de pata de arbotante, m

npa – Cantidad de patas del arbotante, m.

S_{mn} – Área mojada del núcleo del arbotante, m^2

$$S_{mn} = \pi * d_a * l_n$$

d_a – Diámetro del núcleo del arbotante, m

l_n – Largo del núcleo del arbotante, m

18. Intensidad de corriente total del arbotante.

$$I_{ta} = S_{ma} * DC_a * f_{drf} \quad (19)$$

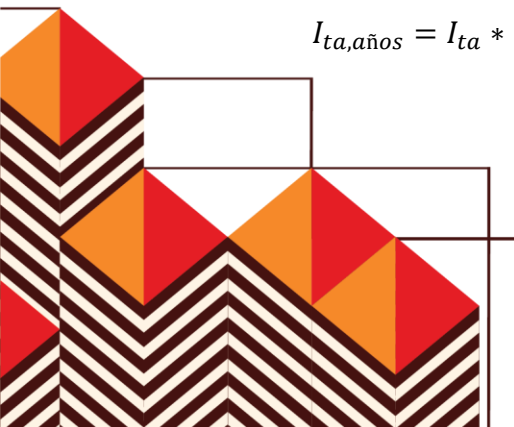
Donde:

I_{ta} – Intensidad de corriente total del arbotante, mA

DC_a – Densidad de corriente del arbotante, mA/m^2

19. Intensidad de corriente total de los arbotantes por años.

$$I_{ta,años} = I_{ta} * 365 * 24 * t \quad (20)$$



Donde:

$I_{ta,años}$ – Intensidad de corriente total de los arbotantes por años, (Ah)

20. Masa total de ánodos en los arbotantes

$$M_{ta} = \frac{I_{ta,años}}{I_a * R_a * F_u} \quad (21)$$

21. Cantidad total de ánodos en los arbotantes.

$$C_{aa} = \left(\frac{M_{ta}}{P_{aa}} \right) * n_a \quad (22)$$

Donde:

P_{aa} – Peso del ánodo en los arbotantes, Kg

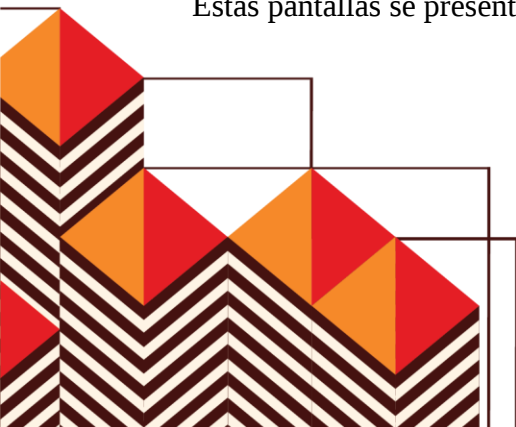
n_a – Cantidad de arbotantes, u

3. RESULTADOS

Se obtuvo como resultado un sistema de protección catódica de los buques que muestra la siguiente estructura:

1. Pantalla de presentación, entrada de los datos iniciales y muestra de los resultados finales. (Hoja con denominación “CALCULO”).
2. Pantalla de formulario. (Hoja con denominación “FORMULARIO”). Se presenta el modelo matemático y el proceso de cálculo completo.
3. Pantalla de ayuda (Hoja con denominación “AYUDA”). Se brinda la ayuda necesaria para escoger los datos imprescindibles para el cálculo.

Estas pantallas se presentan como se muestra en las siguientes figuras:



1. Pantalla “CÁLCULO”.

PROTECCION CATODICA DE LOS BUQUES			
DATOS INICIALES DEL BUQUE			CANTIDAD DE ANODOS
CASCO	VALOR	U/M	
1 MATERIAL DEL CASCO (ACERO O ALUMINIO)	ACERO	-	ESPEJO POPA 8
2 MATERIAL DEL ANODO(ZINC, ALUMINIO O MAGNESIO)	ZINC	-	BANDAS Y FONDO 20
3 ESLOJA a/ PERPEND Lpp	32,141	m	PALAS TIMON 6
4 MANGA DE TRAZADO B	7,1	m	ARBOTANTES 2
5 CALADO D	3,8	m	CAJAS DE MAR 2
6 COEF DE BLOQUE Bc	0,572	-	TOTAL EN CASCO
7 DIAMETRO DE LA HELICE	2,08	m	TOTAL GENERAL
8 CANT DE HELICES Ch	1	u	
9 DENS DE CORR CASCO DCc	35	m ² /m ²	
10 DENS DE CORR HELICE DCCh	220	m ² /m ²	
11 FACTOR DETER RECURR FINAL PINTURA Fdfr	0,4	-	
12 AÑOS DE TRABAJO DE LOS ANODOS t	3	u	
13 CAPAC ELECT TEORICA DEL ANODO Ia (ZINC 0,08 ALUMINIO 0,2700 MAGN 0,2200)	820	Ah/Kg	
14 RENDIMIENTO DEL ANODO Fc(85%)	0,95	-	
15 FACTOR DE UTILIZACION DEL ANODO Fu(85%)(0,85)	0,85	-	
16 PESO DE CADA ANODO A INSTALAR EN EL CASCO Pa	5,6	Kg	
CAJA DE MAR			
17 ANCHO CAJA DE MAR a	0,5	m	
18 ALTURA CAJA DE MAR h	0,7	m	
19 PROFUNDIDAD CAJA DE MAR p	0,5	m	
20 DENSIDAD DE CORR CAJA DE MAR DCcm	220	m ² /m ²	
21 PESO DE CADA ANODO A INSTALAR EN CAJA DE MAR Pcam	5,6	Kg	
22 CANTIDAD DE CAJAS DE MAR	2	u	
PALAS DE TIMON			
23 DENSIDAD DE CORR PALA DE TIMON DCp	220	m ² /m ²	
24 ANCHO DE LA PALA ap	1	m	
25 ALTURA DE LA PALA hp	2,25	m	
26 CANT DE PALAS DE TIMON np	2	u	
27 PESO DE CADA ANODO A INSTALAR EN PALA DE TIMON	5,6	Kg	
ARBOTANTES			
28 ANCHO DE PATA DE ARBOTANTE ba	0,6	m	
29 ALTURA DE PATA DE ARBOTANTE ha	0,8	m	
30 CANTIDAD DE PATAS DEL ARBOTANTE npa	1	u	
31 DENSIDAD DE CORR ARBOTANTE DCa	220	m ² /m ²	
32 DIAMETRO EXTERIOR DEL NUCLEO DEL ARBOTANTE da	0,2	m	
33 LARGO DEL NUCLEO DEL ARBOTANTE ln	0,25	m	
34 CANT DE ARBOTANTES na	2	u	
35 PESO DE CADA ANODO A INSTALAR EN ARBOTANTE Paas	5,6	Kg	

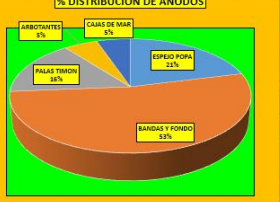
LEYENDA

OBLIGATORIO INTRODUCIR VALORES

OPCIONAL

VALORES INTRODUCIDOS POR DEFECTO

% DISTRIBUCION DE ANODOS



AYUDA

Fig 7. Entrada de datos iniciales.

2. Pantalla “FORMULARIO 1ra PARTE”.

CÁLCULO DE PROTECCION CATODICA DE LOS BUQUES		
1. DATOS INICIALES DEL BUQUE		
CASCO	VALOR	U/M
*MATERIAL DEL CASCO (ACERO O ALUMINIO)	ACERO	-
*MATERIAL DEL ANODO(ZINC, ALUMINIO O MAGNESIO)	ZINC	-
*ESLOJA a/ PERPEND Lpp	38,5	m
*MANGA DE TRAZADO B	7,1	m
*CALADO D	3,23	m
*COEF DE BLOQUE Bc	0,572	-
*DIAMETRO DE LA HELICE	2,08	m
*CANT DE HELICES Ch	1	u
*DENS DE CORR CASCO DCc	35	m ² /m ²
*DENS DE CORR HELICE DCCh	220	m ² /m ²
*FACTOR DETER RECURR FINAL PINTURA Fdfr	0,4	-
*AÑOS DE TRABAJO DE LOS ANODOS t	3	u
*CAPAC ELECT TEORICA DEL ANODO Ia	820	Ah/Kg
*RENDIMIENTO DEL ANODO Fc(85%)	0,95	-
*FACTOR DE UTILIZACION DEL ANODO Fu(85%)	0,85	-
*PESO DE CADA ANODO A INSTALAR EN EL CASCO Pac	10	Kg
CAJA DE MAR		
*ANCHO CAJA DE MAR a	0,5	m
*ALTURA CAJA DE MAR h	0,7	m
*PROFUNDIDAD CAJA DE MAR p	0,5	m
*DENSIDAD DE CORR CAJA DE MAR DCcm	220	m ² /m ²
*PESO DE CADA ANODO A INSTALAR EN CAJA DE MAR Pcam	5,6	Kg
*CANT CAJAS DE MAR ncm	2	u
PALAS DE TIMON		
*DENSIDAD DE CORR PALA DE TIMON DCt	220	m ² /m ²
*ANCHO DE PALA DE TIMON b	1	m
*ALTURA DE PALA DE TIMON hp	2,25	m
*CANT DE PALAS DE TIMON np	2	u
*PESO DE CADA ANODO A INSTALAR EN PALA DE TIMON Papt	5,6	Kg
ARBOTANTES		
*ANCHO DE PATA DE ARBOTANTE ba	0,6	m
*ALTURA DE PATA DE ARBOTANTE ha	0,8	m
*CANTIDAD DE PATAS DEL ARBOTANTE npa	1	u
*DENSIDAD DE CORR ARBOTANTE DCa	220	m ² /m ²
*DIAMETRO EXTERIOR DEL NUCLEO DEL ARBOTANTE da	0,2	m
*LARGO DEL NUCLEO DEL ARBOTANTE ln	0,25	m
*CANT DE ARBOTANTES na	2	u
*PESO DE CADA ANODO A INSTALAR EN ARBOTANTE Paas	5,6	Kg

RETORNAR A HOJA INICIAL



Fig 8. Datos de entrada del formulario para el cálculo

$I_{\text{m}} = \text{Intensidad total} = (I_{\text{m1}} \times D_{\text{c1}} \times D_{\text{c2}}) + (I_{\text{m2}} \times D_{\text{c1}})$

$I_{\text{m1}} = (1.8 \times I_{\text{d1}} \times D) + (R) \times I_{\text{d2}} \times B$

$f_{\text{dfr}} = \text{Factor de deterioro de recubrimiento final}$
 $f_{\text{dfr}} = a + b \times t_f$; 0.4 (pintura con efecto 80%)

DENOMINACIÓN	Esp. moj casco	Zm(m)	Lpp(m)	D(Calado)(m)	B(coc bloque)	B(Mus)(m)
AREA SUP MOJADA		380,20	38,5	3,230	0,572	7,30

DENOMINACIÓN	ln(A)=[2m'DC'c'dfr]+(2m'DC'c) (A)	3m(m)	Dcas corr casco	Factor deterioro recubrimiento final	Esp.moj. helice	CANIT HELICES(v)	Dcas corr helice
INT CORR TOTAL		7,0827	380,20	35	0.4	8,00	220
					Esp.mojada helice 2m' = $(2m' \times (1 + 1.177786) \times 2)$ 2m' = $(2m' \times 3.177786) = 2$ 1.177786-coeficiente usado en cuenta la inclinación de las super.		

DENOMINACIÓN	ln'=(ln(A))ln'365'24' (A)	t(Áos)	Capac elect teórica del anodo
INT CORR TOTAL POR AÑO ln'=(A) (A)		166154,2174	3

DENOMINACIÓN	Mnln'=(ln'xIt) (kg)	It (Ah/kg)	Capac elect teórica del anodo
MASA DE ANODO A INSTALARln'(g)		226,393	920

DENOMINACIÓN	Mnln'=(ln'xIt)xY (g)	Y	PESO CADA ANODO A INSTALAR EN CASCO
MASA REAL DE ANODO A INSTALARln'(g) SEGUN RENDIMIENTO Y		281,056	10

DENOMINACIÓN	N=(masa (g)/It)xY (n)	It (Ah/kg)	PESO CADA ANODO A INSTALAR EN CASCO
CALCULO DE NUMERO DE ANODOS A INSTALAR		28,11	10
CONCLUSION FINAL DEL ANODO EN EL CASCO		28	
ANODOS EN POZA (v)		28	
ANODOS EN BANCA Y FONDO (n)		20	

El número de ánodos será:

$$N_{\text{banca}} = \frac{\text{Peso total de otro } N_{\text{casco}}}{\text{Peso de cada anodo}} = \frac{71,66}{1,6} = 12,97 \text{ ánodos}$$

3. PROTECCIÓN DE CAJA DE MAR

DENOMINACIÓN	3m(m)=(2h'x'p)+4h'x'p	1,65	Dcas corr caja de mar	Dcas(m/A/m)	F'dfr	0.4
SUPERFICIE MOJADA CAJA DE MAR (m²)		1,65	220			

La superficie mojada es el sumatorio de fondo más cuatro costados.

$$3m_{\text{cas}} = (0,5x0,5) + (4x0,5x0,7) = 1,65m^2$$

DENOMINACIÓN	h'cas(A)=[2m'DC'c'F'dfr] (A)	0,1452	Dcas corr caja de mar	Dcas(m/A/m)	F'dfr	0.4
INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL h'cas(A)		0,1452	220			

INTENSIDAD DE CORR EN AÑOS (A)	ln'cas=(A)x365'24' (A)	t(Áos)	Capac elect teórica del anodo
DENOMINACIÓN			It (Ah/kg)
CANT CORR TOTAL GASTADA POR AÑOln'(A)		395,656	3

DENOMINACIÓN	Mnln'cas=(ln'casxIt)xY (g)	It (Ah/kg)	Capac elect teórica del anodo
MASA DE ANODO A INSTALAR EN CAJAS DE MAR Mnln'(g)		1,9	920

DENOMINACIÓN	Ccasn'=(Mnln'cas/Pcasn'xscn (v)	Pcasn' (g/v)	Peso cada anodo en caja de mar	Cant cajas de mar
CANTIDAD TOTAL DE ANODOS EN LAS CAJAS DE MAR Ccasn'(v)		2,09	5,6	2
CONCLUSION FINAL DE ANODOS EN CAJAS DE MAR (v)		2		

4. PROTECCIÓN PALA DE TIMON

DENOMINACIÓN	3mp=(2p'x'p) (m²)	4,50	Ancho de pala b(m)	Altera de pala tp(m)	35
SUPERFICIE MOJADA PALA DE TIMON (m²)		4,50			

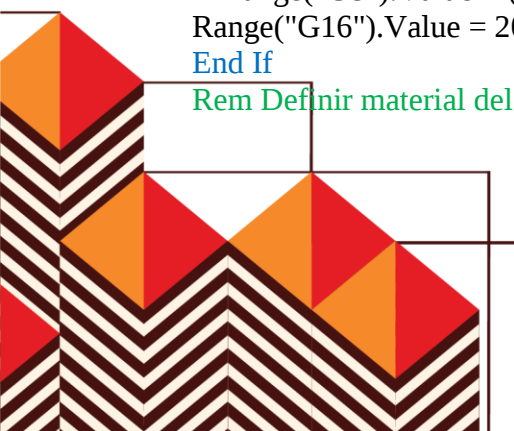
4. Pantalla “FORMULARIO 3ra PARTE”.

4. PROTECCIÓN PALA DE TIMON									
DENOMINACION	$Imgb \cdot h_p^2 \cdot m2$ (m2)	Area de pala b(m)	Altura de pala h(m)						
SUPERFICIE MOJADA CADA PALA DE TIMON (m2)	4.50	1	2.25						
DENOMINACION	$h_p \cdot Img \cdot DC \cdot V \cdot df$ (m4)	$DC(m \cdot An2)$	$F \cdot df$						
INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL DE PALA h(p)m4	336.00	200	0.4						
DENOMINACION	$h_p \cdot u \cdot cos \theta \cdot 365 \cdot 24 \cdot h$ (Ah)	i (Años)							
INTENSIDAD DE CORR TOTAL DE PALA POR AÑOS h(p)u cos (Ah)	10406.68	5							
DENOMINACION	MASA TOTAL DEL ANODO EN LAS PALAS $M_{anodo} = \rho_{anodo} \cdot A_{anodo} \cdot l_{anodo} \cdot V_{anodo}$ (Kg)	CAPACIDAD ELECTRICA DEL ANODO h (Ah/Kg)	FACTOR DE UTILIZACION DEL ANODO(%)	RENDIMIENTO DEL ANODO(%)					
MASA DE ANODO TOTAL A INSTALAR EN LAS PALAS DE TIMON M(h)kg	6.111	820	0.95	0.95					
DENOMINACION	CANT TOTAL DE ANODOS EN LAS PALAS $C_{anodo} = M(h) / P_{anodo}$ (u)	Peso cada anodo en pala de timon. P(an) (Kg)	Cant pala de timon p(p)						
CANT TOTAL DE ANODOS EN LAS PALAS C(an)u	5.61	5.6	2						
CONCLUSION FINAL DE ANODOS EN PALAS DE TIMON (u)	6								
5. PROTECCIÓN DEL ARBOTANTE									
DENOMINACION	$Imab \cdot h_a^2 \cdot m^2 \cdot pa \cdot m$ (m2)	Area de pata de arbotante b(m)	Altura de pata de arbotante h(m)	Cant de pata del arbotante pa(p)	Area mojada del núcleo del arbotante S _{ma} (m2)	Perímetro del núcleo del arbotante P _n (m)	Diámetro exterior del núcleo del arbotante d _e (m)	Largo del núcleo del arbotante l _n (m)	
SUPERFICIE MOJADA DE CADA ARBOTANTE (m2)	12	0.6	0.6	0.6	0.57	0.625	0.2	0.2	
DENOMINACION	$h_a \cdot Imab \cdot DC \cdot V \cdot df$ (m4)	$DC(m \cdot An2)$	$F \cdot df$						
INTENSIDAD DE CORRIENTE TOTAL DEL ARBOTANTE h(a)m4	35.3	200	0.4						
DENOMINACION	$h_a \cdot u \cdot cos \theta \cdot 365 \cdot 24 \cdot h$ (Ah)	i (Años)							
INTENSIDAD DE CORR TOTAL DE LOS ARBOTANTES POR AÑOS h(a)u cos (Ah)	2503.2	5							
DENOMINACION	MASA TOTAL DE ANODOS EN CADA ARBOTANTE $M_{anodo} = \rho_{anodo} \cdot A_{anodo} \cdot l_{anodo} \cdot V_{anodo}$ (Kg)	CAPACIDAD ELECTRICA DEL ANODO h (Ah/Kg)	RENDIMIENTO DEL ANODO h	FACTOR DE UTILIZACION DEL					
MASA DE ANODO TOTAL A INSTALAR EN CADA ARBOTANTE M(h)kg	5.9	820	0.95	0.95					
DENOMINACION	CANT TOTAL DE ANODOS EN LOS ARBOTANTES $C_{anodo} = M(h) / P_{anodo}$ (u)	Peso cada anodo en arbotante P(an) (Kg)	Cant de arbotante n(a)						
CANT TOTAL DE ANODOS EN LOS ARBOTANTES C(an)u	14	5.6	2						
CONCLUSION FINAL DE ANODOS EN LOS ARBOTANTES (u)	2								
6. RADIO DE ACCIÓN DEL ANODO (m)									
DENOMINACION	r_a (m) $\cdot RAIZ(2h^3/3 \cdot MC \cdot C)$ (m)	Intensidad de corr del anodo (A)	Dens cor r cisco $DC(m \cdot An2)$						
RADIO DE ACCIÓN DEL ANODO r(a)m	3	500.00	35						
7. ESPACIAMIENTO PARA UBICACIÓN DE ANODOS (m)									
DENOMINACION	h (m)	El error entre perpendiculares (m)	Anodo en banda y fondo						
ESPACIAMIENTO REQUERIDO EN BANDAS Y FONDO 3(h)m	3.05	39.5	20						
DENOMINACION	$3(p \cdot m) \cdot b \cdot h(p)$ (m)	$M_{anodo} \cdot E(p)$	Anodo en paja h(p)m						
ESPACIAMIENTO EN LA BANDA 3(p)m	0.63	1	1						

Fig 10. Formulario 3ra parte.

[illegible]

**DESAMPARADOS No.201, MUELLE “JUAN MANUEL DÍAZ”,
HABANA VIEJA, LA HABANA, CUBA.
Telef: (53) 7861 0920
ipin@enet.cu**



```
If Range("G9").Value <> ("ZINC") And Range("G9").Value <> ("ALUMINIO") And  
Range("G9").Value <> ("MAGNESIO") Then  
MsgBox ("INTRODUZCA ZINC O ALUMINIO O MAGNESIO EN MAYUSCULAS")  
Exit Sub  
End If  
Rem Introducir propiedades del ánodo de ZINC  
If Range("G9").Value = ("ZINC") Then  
Range("G20").Value = 820  
Range("G21").Value = 0.95  
Range("G22").Value = 0.85  
End If  
Rem Introducir propiedades del ánodo de ALUMINIO  
If Range("G9").Value = ("ALUMINIO") Then  
Range("G20").Value = 2700  
Range("G21").Value = 0.9  
Range("G22").Value = 0.85  
End If  
Rem Introducir propiedades del ánodo de MAGNESIO  
If Range("G9").Value = ("MAGNESIO") Then  
Range("G20").Value = 2210  
Range("G21").Value = 0.5  
Range("G22").Value = 0.85  
End If  
Rem Asegurar que los valores no estén vacíos  
If Range("G8").Value = Empty Or Range("G9").Value = Empty Or Range("G10").Value = Empty  
Or Range("G11").Value = Empty Or Range("G12").Value = Empty Or Range("G13").Value =  
Empty Or Range("G19").Value = Empty Or Range("G23").Value = Empty Then  
MsgBox ("DATOS INCOMPLETOS")  
Exit Sub  
End If  
Rem Asegurar que algunos valores de estos vacíos, tomen valores de cero  
If Range("G14").Value = Empty Then  
Range("G14").Value = 0  
End If  
If Range("G15").Value = Empty Then  
Range("G15").Value = 0  
End If  
If Range("G25").Value = Empty Then  
Range("G25").Value = 0
```

```
End If
If Range("G26").Value = Empty Then
Range("G26").Value = 0
End If
If Range("G27").Value = Empty Then
Range("G27").Value = 0
End If
If Range("G29").Value = Empty Then
Range("G29").Value = 0
End If
If Range("G30").Value = Empty Then
Range("G30").Value = 0
End If
If Range("G33").Value = Empty Then
Range("G33").Value = 0
End If
If Range("G34").Value = Empty Then
Range("G34").Value = 0
End If
If Range("G35").Value = Empty Then
Range("G35").Value = 0
End If
If Range("G36").Value = Empty Then
Range("G36").Value = 0
End If
If Range("G38").Value = Empty Then
Range("G38").Value = 0
End If
If Range("G39").Value = Empty Then
Range("G39").Value = 0
End If
If Range("G40").Value = Empty Then
Range("G40").Value = 0
End If
If Range("G42").Value = Empty Then
Range("G42").Value = 0
End If
If Range("G43").Value = Empty Then
Range("G43").Value = 0
```

End If

If Range("G44").Value = Empty Then

Range("G44").Value = 0

End If

If Range("G45").Value = Empty Then

Range("G45").Value = 0

End If

Rem Copiar los valores de entrada en el formulario

Range("G8:G45").Copy

Sheets("FORMULARIO").Range("B4:B41").PasteSpecial xlPasteValues

Rem Copiar valores de resultados en las casillas de entrada

Rem Espejo de popa

Sheets("FORMULARIO").Range("B70").Copy

Sheets("CALCULO").Range("I7").PasteSpecial xlPasteValues

Sheets("CALCULO").Select

Rem Bandas y fondo

Sheets("FORMULARIO").Range("B71").Copy

Sheets("CALCULO").Range("J7").PasteSpecial xlPasteValues

Sheets("CALCULO").Select

Rem Palas de timón

Sheets("FORMULARIO").Range("B104").Copy

Sheets("CALCULO").Range("K7").PasteSpecial xlPasteValues

Sheets("CALCULO").Select

Rem Arbotantes

Sheets("FORMULARIO").Range("B117").Copy

Sheets("CALCULO").Range("L7").PasteSpecial xlPasteValues

Sheets("CALCULO").Select

Rem Cajas de mar

Sheets("FORMULARIO").Range("B90").Copy

Sheets("CALCULO").Range("M7").PasteSpecial xlPasteValues

Sheets("CALCULO").Select

Rem Solucionar valor indefinido de caja de mar

Sheets("CALCULO").Select

If Range("G29,G30").Value = 0 Then

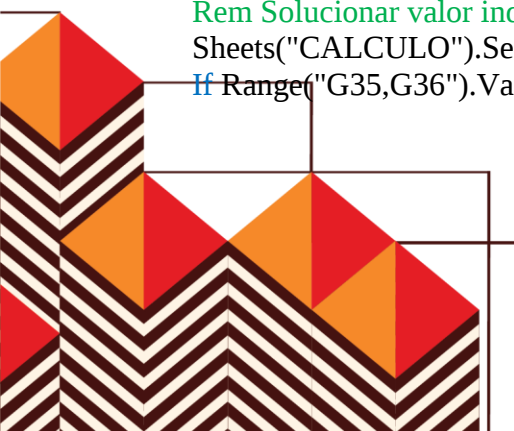
Range("M7").Value = 0

End If

Rem Solucionar valor indefinido de palas de timón

Sheets("CALCULO").Select

If Range("G35,G36").Value = 0 Then



Range("K7").Value = 0

End If

Rem Solucionar valor indefinido de arbotantes

Sheets("CÁLCULO").Select

If Range("G44,G45").Value = 0 Then

Range("L7").Value = 0

End If

Sheets("CÁLCULO").Select

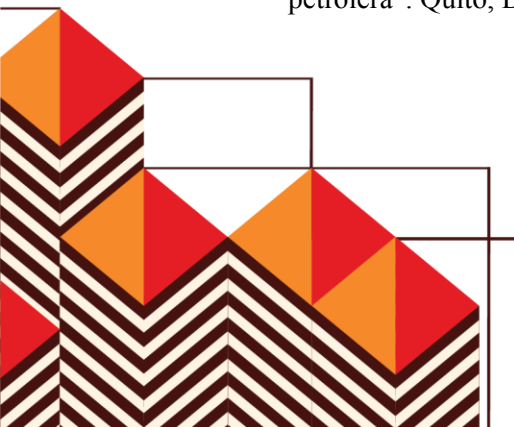
End Sub

4- CONCLUSIONES

1. Se creó un sistema de cálculo de protección catódica de los buques, realizado con macros en Excel, que posibilita una mejor interacción con el usuario y de fácil operación.
2. Se logró una solución práctica a los profesionales del mar, para el cálculo y determinación de la cantidad de ánodos de sacrificio en las diferentes partes de la obra viva del buque.
3. Se confeccionó un esquema de cálculo lo más completamente posible que da respuesta a esta problemática.

5- BIBLIOGRAFIA

1. Báñez García, Sara. "Cálculo, diseño e instalación de los ánodos de sacrificio en una embarcación de pesca". Escuela Técnica Superior de Náutica. Universidad de Cantabria.
2. Fernando Javier. "Sistemas de protección catódica". Mar del Plata, Septiembre 2011.
3. Borrás Salla, Marc. "Desarrollo de una interfaz gráfica y validación del software para el cálculo de la pérdida de potencia en función del aumento de la corrosión en su casco". Universidad Politécnica de Cartagena. Diciembre 2016.
4. Rosario Francia, Samuel. "Protección catódica-Diseño de ánodos de sacrificio". Revista del Instituto de Investigación FIGMMG. Vol 7, No 13, 37-44 (2004) Universidad Nacional Mayor de San Marcos ISSN: 1561-0888 impreso) / 1628-8097 (electrónico).
5. Loachamin Nasimba, Jefferson. "Diseño y simulación de protección catódica en la industria petrolera". Quito, Diciembre 2019.



6. PEMEX. “Diseño, instalación y mantenimiento para los sistemas de protección catódica”. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios. NRF-047-PEMEX-2002. México, Agosto 2022.
7. Rodríguez Conde, Begoña. “Impacto ambiental de los ánodos de sacrificio en la Ría de Vigo”. Universidad de la Coruña. Trabajo de Fin de Maestría. Septiembre 2017.
8. Pérez Pérez, Waldo Fabián. “Estudio técnico-económico del sistema de protección catódica del remolcador de alta mar Pequén de Saam”. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, Abril 2018.
9. Fraga Rivas, Alberto Javier. “Ingeniería Marina: Sistemas de protección catódica a bordo”. Universidad de la Coruña. Trabajo fin de grado. Septiembre 2016.
10. Guidice, Carlos A. Pereyra, Andrea M. “Protección catódica con ánodos galvánicos”. Universidad Tecnológica Nacional facultad regional La Plata.
11. Méndez Pérez, Adonay. “Protección catódica: Ánodos de sacrificio”. Universidad de La Laguna. Septiembre 2016.

