

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO EN BUQUES, BASADO EN LA NORMA IEC 61363-1

Gabriela G. Salas Berrocal – CC Víctor Jiménez González
COTECMAR, Departamento de Electricidad y Electrónica – DIDESI –
Vía Mamonal Km 9
Cartagena (Bol.)
Colombia
Tel: (057) 5 668 53 77
e-mail: gsalas@cotecmar.com

RESUMEN

Sistemas eléctricos diseñados de forma adecuada eventualmente pueden experimentar cortocircuitos, presentándose corrientes extremadamente altas que provocan efectos destructivos sobre sus componentes. En el caso de las instalaciones eléctricas en buques, la confiabilidad y la seguridad son aspectos fundamentales para garantizar la protección de la vida en el mar, a través del buen funcionamiento de las mismas. Por esta razón, es importante realizar una correcta especificación de los componentes del sistema eléctrico, con el fin de que estén en capacidad de soportar las condiciones de temperatura y de esfuerzos mecánicos a las que quedan sometidos después de una falla. La información necesaria para realizar esta especificación proviene del Estudio de Cortocircuito.

Este trabajo presenta una metodología para la realización del cálculo de cortocircuito en buques, basada en la norma de la Comisión Electrotécnica Internacional IEC 61363-1 y desarrollada considerando las diferencias existentes entre las instalaciones eléctricas abordo y las terrestres. Esta metodología fue aplicada para encontrar los niveles de cortocircuito en las barras del tablero principal y de los tableros de distribución secundarios de la Fragata clase “ARC Almirante Padilla” de la Armada Nacional de Colombia, mediante el uso del software DocWin 3,0. Con los resultados obtenidos fueron determinadas las capacidades de corte y cierre mínimas para los dispositivos de interrupción seleccionados en el marco del proceso de modernización de citadas Fragatas.

1. INTRODUCCIÓN

El Cortocircuito es un estado de operación indeseado en cualquier sistema de potencia, durante el cual ocurren una serie de fenómenos transitorios electromagnéticos y electromecánicos de gran magnitud, cuyos efectos ponen en riesgo no sólo la seguridad, confiabilidad y estabilidad del sistema, sino también la vida de las personas que puedan estar expuestos a ellos. Consiste en el contacto accidental o intencional, de resistencia o impedancia relativamente baja, entre dos o más puntos a diferentes potenciales de un circuito.¹ Como resultado de este contacto surgen corrientes muy elevadas (muchas veces mayores a las corrientes de carga), que circulan directamente hacia el punto de la falla.

Durante una falla los elementos que aportan a la corriente de cortocircuito son llamados *Componentes Activos* y son las máquinas eléctricas rotativas del sistema²: Generadores síncronos, motores síncronos y condensadores, motores de inducción y motores DC de velocidad regulable con fuente de potencia AC de estado sólido.

La respuesta del generador síncrono ante un cortocircuito, cerca o en sus terminales, es similar a la producida al aplicar una tensión AC a un circuito RL. Se distinguen dos componentes transitorias, mostradas en la figura 1 que sumadas constituyen la *corriente asimétrica total*: Una componente de frecuencia fundamental o *componente AC* y una componente unidireccional (DC), que decae exponencialmente durante varios ciclos.

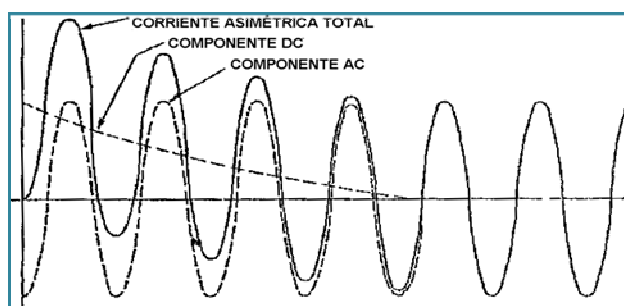


Figura 1. Componentes de la corriente de cortocircuito en la máquina síncrona

Fuente: Estudio para la reducción de la frecuencia de interrupción en el sistema eléctrico del edificio “Petróleos de Venezuela”

¹ Definición tomada del Vocabulario Electrotécnico Internacional: VEI 151-03-41.

² Los capacitores de potencia al descargarse también pueden producir corrientes transitorias de cortocircuito extremadamente altas, pero son de una frecuencia natural muchísimo más alta que la frecuencia industrial y usualmente de una duración muy corta.

Existen diversos métodos utilizados para el cálculo de las corrientes de cortocircuito en una instalación, entre los que tenemos: Reducción de mallas, superposición y *componentes simétricas*.

El método de componentes simétricas es una gran herramienta para la solución de sistemas no balanceados, sin embargo, presenta limitaciones para el análisis variante en el tiempo, necesario para evaluar el comportamiento de la corriente de cortocircuito en sistemas donde la respuesta de los generadores es predominante (como los sistemas eléctricos en buques). Esto quiere decir que el método de componentes simétricas no es la herramienta más adecuada para calcular las corrientes de cortocircuito en los sistemas eléctricos de los buques. Se hace necesario contar con expresiones dependientes del tiempo que permitan representar la respuesta de los generadores en el momento de una falla. Este es el escenario planteado en la norma IEC 61363-1, tal como será tratado más adelante.

2. BUQUES: ¿QUÉ HACE QUE SUS SISTEMAS ELÉCTRICOS SEAN DIFERENTES?

Para todo buque, el diseño de las instalaciones eléctricas se enfoca principalmente hacia el concepto de seguridad, lo que determina algunos rasgos comunes como son: Continuidad del servicio, redundancia de las fuentes de alimentación y robustez de los equipos.³

Con el fin de conseguir la continuidad en el servicio, condición que implica que no se presente interrupción alguna en el suministro durante fallas de los equipos de potencia, los sistemas eléctricos de abordaje **son no aterrizados o no referenciados**, es decir, en este tipo de sistemas no existe conexión intencional entre el neutro, o cualquiera de las fases, y tierra⁴ (casco del buque). A pesar de esto, existen acoples capacitivos entre las estructuras metálicas y los conductores energizados que se extienden de forma paralela a ellas.

Idealmente, los sistemas no aterrizados no proveen un camino de retorno para la corriente en caso de presentarse una falla a tierra, por lo que pueden seguir operando bajo dicha condición, mientras que el sitio de la falla actúa sólo como un punto de referenciamiento (Ver figura 2).

³ Jiménez, Víctor Hugo. Introducción a los sistemas eléctricos en buques.

⁴ Exceptuando las conexiones de los dispositivos medidores de potencial u otros equipos de muy alta impedancia.

Dado que los sistemas eléctricos en buques no pueden considerarse ideales, en condiciones de falla monofásica a tierra fluye una pequeña corriente, generalmente de unos pocos amperios, pero no suficiente para producir un disparo de las protecciones, por lo que el suministro de energía no es interrumpido. Sin embargo, si la falla no es despejada o es intermitente, pueden presentarse graves sobretensiones entre los conductores de fase y la tierra, ocasionadas por el efecto capacitivo ya mencionado.

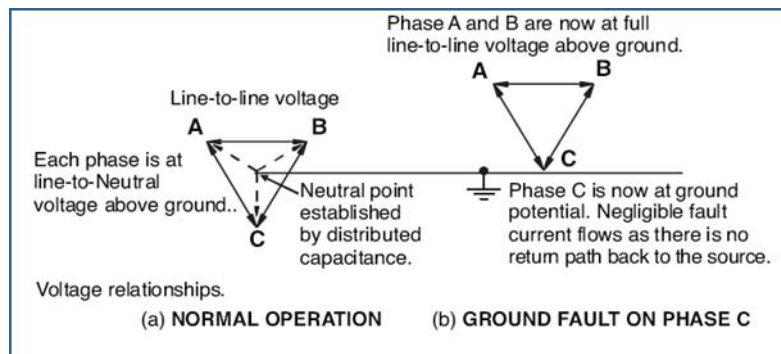


Figura 2. Relaciones de Tensión para sistemas no aterrizados

Fuente: *Ground Fault Protection. Ungrounded Systems to High Resistance Grounding.*

Cuando un buque está navegando, su sistema de potencia está totalmente aislado de cualquier otra fuente de energía, por lo que es conveniente que exista redundancia de las fuentes de alimentación. De acuerdo con el estándar IEEE 45-1998: “*Para buques, el número y capacidad de generadores principales debe ser suficiente para permitir un generador de respaldo (un set fuera de operación) todo el tiempo para servicios esenciales y cargas de habitabilidad*”⁵. Por otra parte, la OMI (Organización Marítima Internacional) recomienda en el documento SOLAS (Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar), edición refundida de 2001 Parte D, “*Instalaciones eléctricas*” lo siguiente: “*La fuente de energía eléctrica principal estará compuesta al menos por dos generadores*” y “*la capacidad de los grupos electrógenos será tal que aunque uno cualquiera de ellos se pare sea posible alimentar los servicios necesarios para lograr condiciones operacionales normales de propulsión y seguridad*”.

Asimismo, las instalaciones eléctricas en buques y en general, en cualquier unidad a flote, deben enfrentar duras condiciones ambientales: Mar en continuo movimiento, altos grados de

⁵ Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Recommended Practice for Electrical Installations on Shipboard. IEEE Std 45-1998.

salinidad, climas cambiantes, denso entorno electromagnético a causa de la operación de radares, radios, teléfonos satelitales, entre otros... Por esto, los equipos de aplicación marina son robustos, diseñados para soportar todas estas condiciones sin sufrir fallas que puedan poner en peligro la continuidad del servicio.

Los sistemas de potencia en buques se diseñan haciendo un balance entre la capacidad de expansión, la disponibilidad de espacio y el desempeño deseado. Esto les da características especiales que los distinguen de los sistemas de potencia tradicionales. Las más notables son:

✎ *Muy poca inercia rotacional del sistema en relación con las cargas:* Por las restricciones de espacio, la capacidad de generación en los buques es limitada, a diferencia de los sistemas terrestres en los que se tiene un gran número de generadores con gran inercia rotacional.

✎ *La rapidez de los controles mantiene la frecuencia del sistema:* La cercanía, tanto física como eléctrica, de los componentes del sistema implica que la información de control pasa muy rápido entre las partes. En general, los primotores de los sistemas de generación en buques son típicamente más rápidos que los presentes en sistemas de generación “terrestres”, en lo que se refiere a tiempos dinámicos de interés.

✎ *La longitud del cableado está limitada por el tamaño del buque,* por lo que el comportamiento de las líneas de transmisión no juega un papel tan significativo como lo hace en los sistemas terrestres.

Estas características traen implicaciones como las siguientes:

✎ *Los modelos eléctricos utilizados para los sistemas de potencia típicos usualmente no son apropiados para analizar la dinámica de los sistemas de potencia a bordo de buques.* Se necesitan modelos de orden superior tanto para los generadores como para las cargas.

✎ *Algunos de los conceptos aplicados a los sistemas convencionales no pueden ser transferidos a los sistemas de potencia navales.* Por ejemplo, no es posible hablar de *barrajes infinitos* o de barras de referencia (*slack*). Usualmente, no son válidas las consideraciones de *tensión constante, frecuencia constante y potencia constante*.

✎ *Los sistemas de potencia en buques están fuertemente acoplados tanto eléctrica como mecánicamente.*

✎ *Las fallas* deben ser modeladas de forma consistente con las características de los sistemas eléctricos navales.

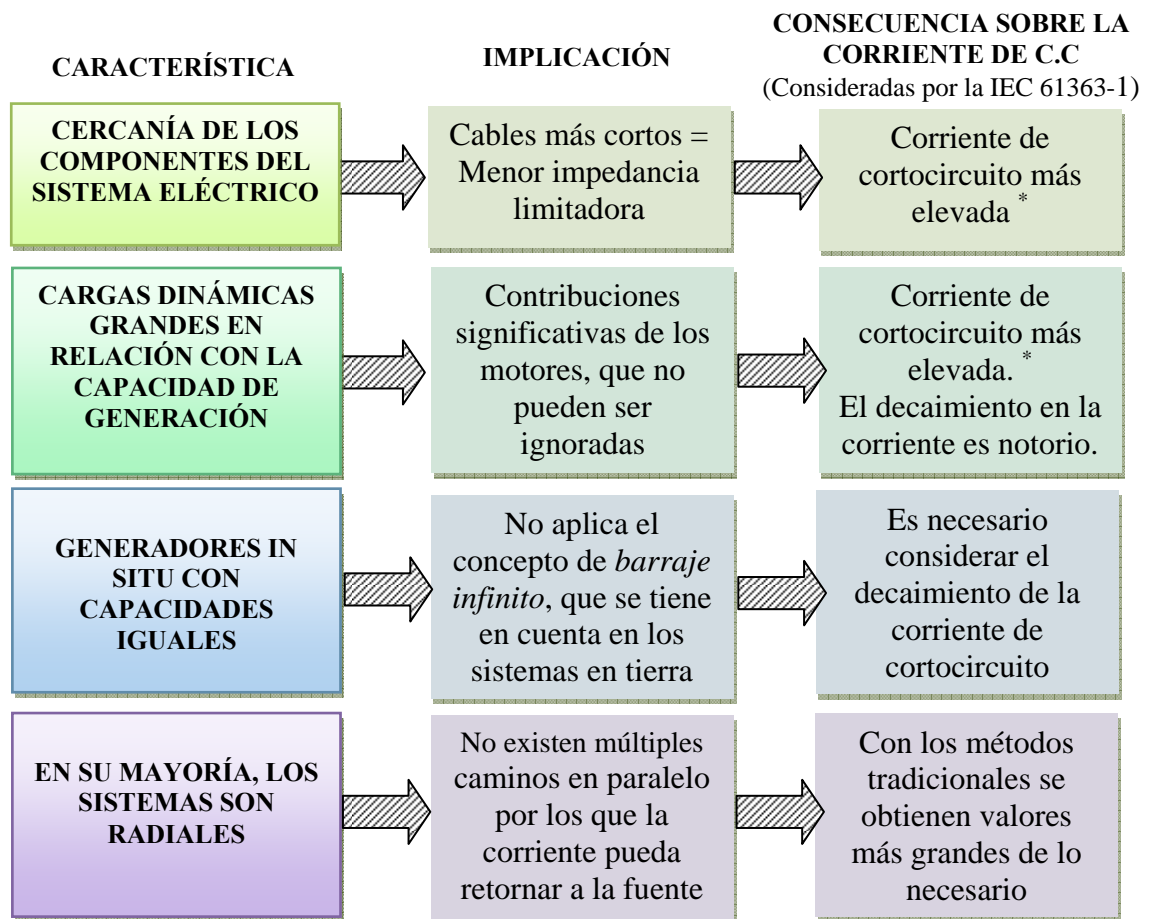
3. UNA NORMA QUE CONSIDERA LAS DIFERENCIAS: IEC 61363-1

En 1998 fue emitido el estándar IEC 61363-1 (única edición hasta el momento), que aborda detalladamente el tema del cálculo de cortocircuito en buques. Reemplazó al estándar IEC 60363 de 1972. La IEC 61363-1 respondió a la necesidad de tener un estándar que considerara los efectos que tienen las características particulares de los sistemas de potencia de abordo sobre la corriente de cortocircuito. El esquema de la figura 3 muestra los aspectos más importantes que fueron tomados en cuenta en el enfoque de esta norma.

La intención del estándar es calcular el mínimo valor de la corriente de cortocircuito máxima prevista, que puede ser utilizado con confianza para la selección de los interruptores y dispositivos de protección. Dado que los buques son, en cuanto a sus sistemas de potencia, plantas generadoras aisladas y debido a la cercanía de los componentes eléctricos, la respuesta de los generadores durante el cortocircuito predomina sobre el comportamiento que exhibe el resto del sistema. Por ello, la norma se desarrolla a partir de una expresión matemática para los generadores, que permite evaluar la *envolvente superior* (Ver curva naranja de la figura 4) de la corriente de cortocircuito, en varios instantes de tiempo, con el fin de obtener los valores aproximados que tendrían que manejar los dispositivos de maniobra y protección en el momento de su apertura.

En el caso de los motores, al considerar el decaimiento en la corriente de cortocircuito, en lugar de considerar una contribución fija de cuatro o seis veces su corriente nominal (como suele hacerse en los sistemas industriales), se consigue una reducción considerable en la corriente calculada para el instante en el que abren los dispositivos de interrupción.

3.1 Modelos matemáticos para los componentes del sistema eléctrico. El estándar desarrolla fórmulas *dependientes del tiempo*, que permiten calcular la corriente de cortocircuito entregada por los componentes activos del sistema e indica que tanto pueden ser simplificadas a la hora de calcular la falla en puntos diferentes del tablero principal de distribución.



*En relación con las corrientes en un sistema de baja tensión en tierra

Figura 3. Características de los sistemas de potencia en buques consideradas por la IEC 61363-1.

Fuente: Diseño propio

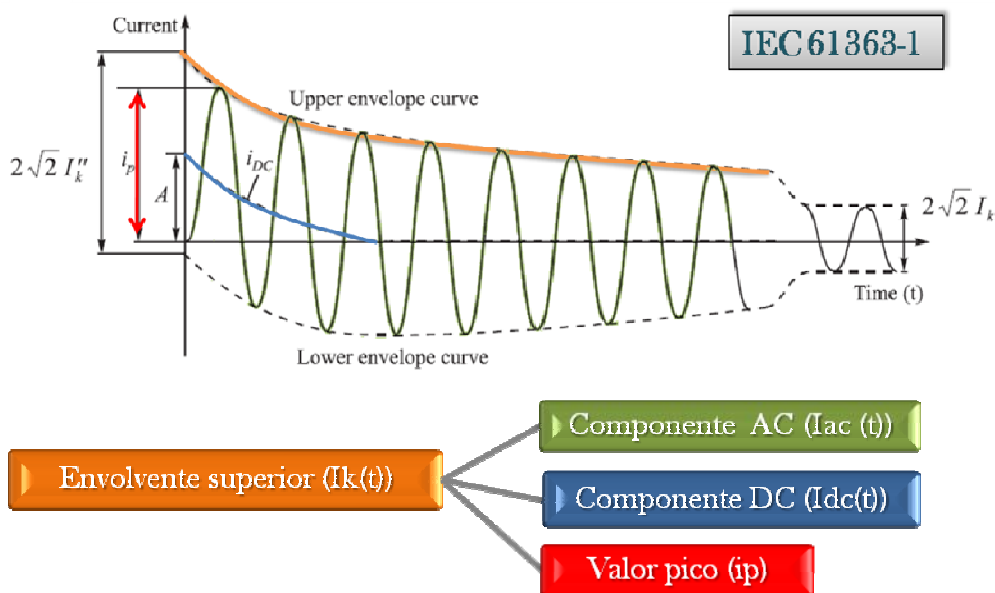


Figura 4. Modelo de la IEC 61363-1 para la corriente de cortocircuito

Fuente: IEC 61363-1

En el caso de las máquinas sincrónicas, la expresión para el cálculo de la corriente de cortocircuito es separada en tres funciones dependientes del tiempo, que en conjunto representan a la envolvente superior de dicha corriente. Las ecuaciones 1, 2 y 3 son las expresiones matemáticas para la componente AC $I_{ac}(t)$, la componente DC $I_{dc}(t)$ y el valor pico i_p de dicha envolvente:

$$I_{ac}(t) = (I''_{kd} - I'_{kd})e^{-\frac{t}{T''_d}} + (I'_{kd} - I_{kd})e^{-\frac{t}{T'_d}} + I_{kd} \quad \text{Ec. 1}$$

$$I_{dc}(t) = \sqrt{2}(I''_{kd} - I_0 \sin \varphi_0)e^{-\frac{t}{T_{dc}}} \quad \text{Ec. 2}$$

$$i_p = \sqrt{2}I_{ac}(t) + I_{dc}(t) \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

I''_{kd} : Corriente de cortocircuito subtransitoria inicial (R.M.S)

I'_{kd} : Corriente de cortocircuito transitoria inicial (R.M.S)

I_{kd} : Corriente de cortocircuito de estado estable

T''_d : Constante de tiempo subtransitoria

T'_d : Constante de tiempo transitoria

I_0 : Corriente de prefalla

φ_0 : Ángulo de fase de la corriente de prefalla

T_{dc} : Constante de tiempo DC

4. METODOLOGÍA PARA LA EJECUCIÓN DEL CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO EN BUQUES: CASO DE ESTUDIO FRAGATA “ARC INDEPENDIENTE”

Actualmente, la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial (COTECMAR), además de realizar el diseño, construcción, mantenimiento y reparación de buques y artefactos navales en diferentes mercados, se encuentra ejecutando el proceso de modernización de las cuatro Fragatas Ligeras tipo FS-1500, Clase “ARC Almirante Padilla” de la Armada Nacional de Colombia, construidas en los astilleros *Howaldtswerke-Deutsche Werft* de Kiel, Alemania, a comienzos de la década de 1980.

La modernización de estas unidades incluye, entre otros aspectos, la renovación de sus sistemas eléctricos, por lo que en la etapa inicial fue necesario adquirir la mayor cantidad y calidad de información acerca de las características y comportamiento de los mismos, recurriendo a los estudios de ingeniería como el *cálculo de cortocircuito*. Por esta razón, fue desarrollada una metodología, basada en la norma IEC 61363-1, para encontrar los niveles de

cortocircuito en las Fragatas anteriormente citadas⁶ y para ser aplicada en los diseños futuros de COTECMAR.



Figura 5. Fragata clase “ARC Almirante Padilla” – ARC Independiente

Fuente: Armada Nacional de Colombia

Las Fragatas disponen de una planta principal de generación y una de emergencia. La planta principal se compone de cuatro grupos electrógenos, cuyas características son mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros eléctricos de los nuevos generadores principales

PARÁMETRO	VALOR
Potencia Nominal (S)	530 KVA
Tensión Nominal (V)	440 V
Frecuencia Nominal (f)	60 Hz
Factor de Potencia (Cos ϕ)	0.8
Reactancia subtransitoria en eje directo (X''_d)	11,7 %
Reactancia subtransitoria en eje de cuadratura (X''_q)	9,8%
Reactancia transitoria en eje directo (X'_d)	14,5%
Reactancia sincrónica en eje directo (X_d)	314%
Reactancia sincrónica en eje de cuadratura (X_q)	189%
Constante de tiempo subtransitoria en eje directo (T''_d)	10 ms
Constante de tiempo transitoria en eje directo (T'_d)	100 ms
Constante de tiempo DC (T_{dc})	15 ms

El sistema de emergencia es alimentado por un grupo electrógeno de 192 KVA, conectado a las barras colectoras a través de un interruptor ubicado en el panel de generador del tablero de distribución de emergencia. Sus características son mostradas en la Tabla 2.

⁶ Dado que los sistemas eléctricos de los cuatro buques son prácticamente iguales, fue tomada como caso de estudio la Fragata “ARC Independiente”.

Tabla 2. Parámetros eléctricos del generador de emergencia

PARÁMETRO	VALOR
Potencia Nominal (S)	192 KVA
Tensión Nominal (V)	440 V
Frecuencia Nominal (f)	60 Hz
Factor de Potencia (Cos ϕ)	0.8
Resistencia de armadura (R_a)	0,024 Ω /fase
Reactancia subtransitoria en eje directo (X''_d)	13 %
Reactancia subtransitoria en eje de cuadratura (X''_q)	19%
Reactancia transitoria en eje directo (X'_d)	20%
Reactancia sincrónica en eje directo (X_d)	237%
Reactancia sincrónica en eje de cuadratura (X_q)	143%
Constante de tiempo subtransitoria en eje directo (T''_d)	11 ms
Constante de tiempo transitoria en eje directo (T'_d)	35 ms
Constante de tiempo DC (T_{dc})	9 ms

La alimentación desde tierra es proporcionada a través de una toma trifásica de 600 A. La conexión de la toma de tierra se realiza en un panel del tablero de distribución de emergencia y mediante la interconexión existente entre éste y el tablero principal, puede suministrarse potencia a las cargas del sistema principal.

El sistema de distribución del buque es básicamente *radial*, con el punto neutro sin aterrizar, y se realiza en los siguientes niveles de tensión: **440 V– 60 Hz –3 ϕ** (alimentación de tensión principal y sistemas de armamento), **220 V– 60 Hz –3 ϕ** (enfermería), 115V– 60 Hz –3 ϕ (Sistema de iluminación principal y de emergencia, sistemas de radio y comunicaciones), **115V–400 Hz– 3 ϕ** (Sistemas de radio, navegación y armamento), **24 v_{DC}** (indicadores, sistema de arranque del primotor de cada uno de los generadores, algunos sistemas de órdenes y señales), **110 V/60 Hz** (Sistema de control de contactores y relés) y **24 V/ 60 Hz** (luces piloto).

El buque está equipado con transformadores tipo seco, conexión DD (Delta-Delta), a través de los cuales se obtienen los niveles de tensión especificados anteriormente. En la Tabla 3 son mostradas las características de cortocircuito de los transformadores a bordo de las Fragatas.

Teniendo en cuenta la información del sistema eléctrico de la Fragata “ARC Independiente” y tomando como referencia la norma IEC 61363-1, fue desarrollada una metodología para el cálculo de cortocircuito en buques, que considera los aspectos necesarios para la ejecución del cálculo de corrientes de cortocircuito y para la revisión de los resultados. En la Tabla 4 se encuentra esquematizada la metodología propuesta.

Tabla 3. Resistencias y reactancias calculadas para los transformadores

ID	ESPECIFICACIÓN	S (KVA)	U_{rR} (%)	U_{rK} (%)	R_T (Ω)	X_T (Ω)
1TF	3 ϕ ,60 Hz, 440/115V	6	3,8	4	0,083758	0,02753
2TF	3 ϕ ,60 Hz, 440/115V	6	3,8	4	0,083758	0,02753
3TF	3 ϕ ,60 Hz, 440/115V	6	3,8	4	0,083758	0,02753
4TF	3 ϕ ,60 Hz, 440/220V	3	3,8	4	0,167516	0,05506
5TF	3 ϕ ,60 Hz, 440/115V	6	3,8	4	0,083758	0,02753
6TF	3 ϕ ,60 Hz, 440/115V	30	3,8	4	0,016751	0,00550
7TF	3 ϕ ,60 Hz, 440/115V	30	3,8	4	0,016751	0,00550
8TF	3 ϕ ,60 Hz, 440/115V	6	3,8	4	0,083758	0,02753
9TF	3 ϕ ,60 Hz, 440/115V	6	3,8	4	0,083758	0,02753
10TF	3 ϕ ,60 Hz, 440/115V	6	3,8	4	0,083758	0,02753
11TF	3 ϕ ,60 Hz, 440/115V	6	3,8	4	0,083758	0,02753

5. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA REALIZACIÓN DEL CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO EN LA FRAGATA “ARC INDEPENDIENTE”

En la segunda columna de la Tabla 4 se encuentran los principales aspectos tenidos en cuenta en la realización del cálculo de cortocircuito en la Fragata “ARC Independiente”, siguiendo la metodología propuesta.

Después de haber definido el objetivo y el propósito del estudio y de haber seleccionado los puntos de la instalación para la realización del cálculo, fue determinada la condición de operación en la que se presentaría la mayor corriente de cortocircuito en el sistema. Se seleccionó como condición de operación base para el estudio “*buque listo para la acción*”.

A continuación, fueron determinados los parámetros de cortocircuito para los *componentes activos*: Generadores principales, generador de emergencia y motores; y para los *componentes pasivos*: Cables y transformadores.

El diagrama unifilar de la fragata ARC Independiente fue preparado en el software *DocWin 3.0* (Ver figura 6) y a través del comando *configuración de la red* fue posible simular la condición de operación elegida para la realización del cálculo de cortocircuito. Esta información fue obtenida a partir del balance de cargas del buque

Tabla 4. Cuadro resumen – Metodología vs. Implementación en la Fragata “ARC Independiente”

ETAPA METODOLOGÍA	ACTIVIDADES A REALIZAR	IMPLEMENTACIÓN “ARC INDEPENDIENTE”
<p style="text-align: center;">DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</p>	<p>Determinar <i>objetivo</i> y <i>propósito del estudio</i>:</p> <p>Propósitos contemplados por la norma: Especificación de capacidades de corte y de cierre de los dispositivos de interrupción y coordinación de protecciones.</p>	<p>✍ <i>Objetivo</i>: Estimar la corriente de cortocircuito en el tablero principal y en los tableros de distribución secundarios.</p> <p>✍ <i>Propósito</i>: Determinar las capacidades de cortocircuito (corte y cierre) de los interruptores instalados durante el proceso de modernización del sistema eléctrico.</p>
	<p>Realizar breve descripción de condiciones particulares.</p>	<p>✍ Reemplazo de los generadores originales.</p> <p>✍ Reemplazo de los interruptores de desconexión de fusibles por interruptores automáticos.</p>
	<p>Especificar si el proyecto es una Nueva Construcción o una modernización.</p>	<p>Modernización</p>
	<p>Indicar puntos del sistema para ejecución del cálculo⁷:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✍ Generador ✍ Barrajes principales ✍ Barrajes de emergencia ✍ Paneles Distr. principales 	<p>Cálculo ejecutado en los siguientes puntos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✍ Generador ✍ Barrajes principales ✍ Barrajes de emergencia ✍ Paneles Distr. principales
<p style="text-align: center;">SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN</p> <p><i>De acuerdo con el propósito establecido en la fase anterior, son escogidas las condiciones de operación para las cuales debe ser realizado el cálc. de cortocircuito, de la siguiente forma:</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> ✍ Especificación de la capacidad de corte y de cierre de los interruptores: Considerar las condiciones de operación de mayor consumo, seleccionadas con ayuda del balance de cargas del buque. ✍ Selección de los valores de ajuste de los dispositivos de protección: <ul style="list-style-type: none"> a) Para coordinación de protecciones: Condición de operación de menor consumo⁸ (menor valor disponible de la corriente de cortocircuito). b) Ajustes instantáneos de los interruptores automáticos: Aplica información para especificación de capacidad de corte y de cierre. 	<p>Debe ser considerada la condición de operación de mayor consumo: Buque listo para la acción. (1500 KVA)</p>

⁷ Siguiendo las recomendaciones del estándar 2008 de la casa clasificadora Germanischer Lloyd (GL).

⁸ Según el artículo 5.9.2 del estándar IEEE 45-2002, la corriente de cortocircuito mínima se obtiene al evaluar el sistema con el número mínimo de generadores y sin la carga de los motores.

PREPARACIÓN DE DIAGRAMAS UNIFILARES	Diagrama unifilar para cada condición de operación considerada, mostrando elementos activos y no activos.	El diagrama unifilar de la fragata ARC Independiente fue preparado en el software <i>DocWin 3.0</i> .
	Utilizar datos provistos por tablas de impedancia para generadores, cables y motores, valores típicos o pueden suposiciones de las secciones 5.2.3, 6.3.3 o 6.3.4 de la norma IEC 61363-1, aclarando cuáles de los parámetros son propios de los equipos y cuales son supuestos.	Fueron utilizados datos de fabricante para los generadores (Ver tablas 2 y 3). En el caso de los motores y de los cables fueron utilizadas impedancias típicas
EJECUCIÓN DEL CÁLCULO DEPENDIENTE DEL TIEMPO	Herramienta principal: Software de análisis de sistemas de potencia con módulo de la norma IEC 61363-1. ✎ Valores recomendados para instalaciones de baja tensión: $t=8,33$ ms y $t=16,67$ ms. ✎ Para instalaciones de alta tensión: $t=50$ ms (3 ciclos) y $t=500$ ms (30 ciclos) o cualquier valor más allá de los 6 ciclos.	Software utilizado: DocWin 3.0 de ABB. ✎ El cálculo fue ejecutado para los instantes $t= 8ms$; $16,67ms$; 50 ms y 100 ms.
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	Después de que el software entrega los resultados, éstos deben ser tabulados en el formato destinado para tal fin.	Los resultados fueron consignados en el formato. (Ver tabla 6)
INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	De acuerdo con los criterios establecido en la sección 9 de la norma IEC 61363-1 y resumidos en la Tabla	Los resultados fueron interpretados conforme a lo establecido en la norma. (Ver tabla 5)

Tabla 5. Criterios para análisis de resultados según la IEC 61363-1

	SISTEMAS CON $V_{NOMINAL} \leq 1KV$	SISTEMAS CON $V_{NOMINAL} > 1KV$
Capacidad nominal de cierre en cortocircuito (I_{cm})	$I_{cm} > i_p$, garantizada a una tensión de operación no inferior a la tensión nominal del sistema.	$I_{cm} > i_p$, garantizada a una tensión de operación no inferior a la tensión nominal del sistema.
Capacidad nominal de corte en cortocircuito (I_{cu})	$I_{cm} > I_{ac}(t)$, garantizada a una tensión de operación no inferior a la tensión nominal del sistema.	$I_{cm} > I_{ac}(t)$, para t entre 10 y 80 ms. Garantizada a una tensión de operación no inferior a la tensión nominal del sistema.
Máximo valor aceptable de la componente DC	No es relevante.	El valor calculado a la apertura del interruptor no debe ser mayor al máx. valor aceptable por el fabricante.

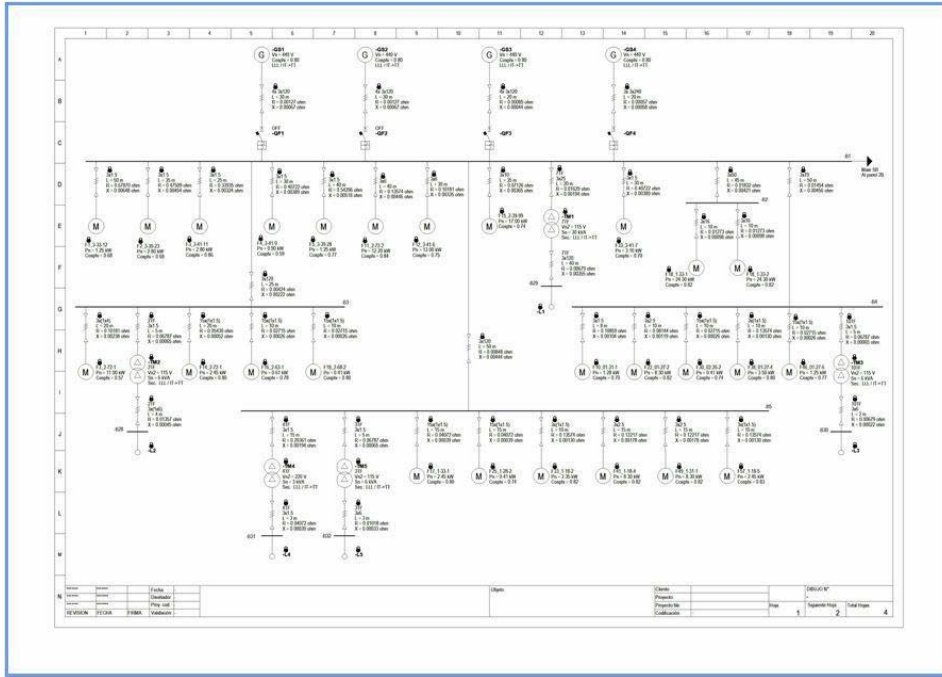


Figura 6. Creación del diagrama unifilar del “ARC Independiente” en DocWin 3.0

En la simulación realizada se encontraron los valores de las funciones $I_{ac}(t)$, $I_{dc}(t)$ e $I_k(t)$ para los instantes ms, $t=16,67$ ms, $t=50$ ms y $t=100$ ms, en las barras del tablero principal y de los tableros de distribución secundarios del buque. En la Tabla 6 son mostrados los resultados obtenidos para el barraje principal y uno de los paneles de distribución de 440 Vac.

5.1 INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con ayuda de un catálogo de interruptores termomagnéticos, con valores normalizados de acuerdo con el estándar IEC 60947-2 (Low-voltage switchgear and controlgear - Part 2: Circuit-breakers) y siguiendo los criterios mostrados en la Tabla 5, fueron determinadas las características de cortocircuito I_{cm} e I_{cu} de los nuevos interruptores termomagnéticos con destino al Tablero Principal.

6. CONCLUSIONES

Los modelos matemáticos y métodos utilizados para encontrar las corrientes de cortocircuito en un sistema de potencia convencional no son adecuados para los sistemas de potencia a bordo de buques. La cercanía, tanto física como eléctrica, de los componentes de estos sistemas eléctricos, ocasiona que las expresiones de cálculo que desconocen el decremento en la corriente de cortocircuito, proporcionen resultados que conllevan al sobredimensionamiento de los dispositivos de maniobra y protección. Por esta razón, el

Tabla 6. Resultados Tablero Principal (1S)

Barra: -B1 (Barraje principal 1S)			
I ["] kLLL		24,292	[kA]
IkLLL		1,585	[kA]
IpLLL		38,064	[kA]
IacLLL(t)	t= 8 ms	16,092	[kA]
	t= 16,67 ms	12,293	[kA]
	t= 50 ms	7,813	[kA]
	t=100 ms	5,379	[kA]
IdcLLL(t)	t= 8 ms	15,316	[kA]
	t= 16,67 ms	7,289	[kA]
	t= 50 ms	0,547	[kA]
	t=100 ms	0,015	[kA]
IkLLL(t)	t= 8 ms	38,072	[kA]
	t= 16,67 ms	24,672	[kA]
	t= 50 ms	11,596	[kA]
	t=100 ms	7,622	[kA]
	t=100 ms	6,134	[kA]

Tabla 7. Selección de interruptores
Paneles de 440 Vac

BARRAJE	I _{nominal} [A]	(I _{cm})[KA]	(I _{cu})[KA]	REF. ESCOGIDA (ABB)
PANELES DE DISTRIBUCIÓN 440V,3φ, 60HZ				
T. Ppal.(1S)	800	63	30	T6N 800
P.D. 2-63-2	250	52.5	25	T3N 250
P.D. 01-26-2	250	52.5	25	T3N 250
P.D. 1-18-1	250	52.5	25	T3N 250
P.D. 2-15-1	400	63	30	T5N 400
P.D. 2-53-2	63	30	15	T1C 160
P.D. 1-49-2	400	63	30	T5N 400
P.D. 1-49-4	250	52.5	25	T3N 250
P.D. 01-43-2	63	30	15	T1C 160
P.D. 3-23-2	160	30	15	T1C 160
TEmerg.(1E)	320	63	30	T4N 320

método de la norma IEC 61363-1 es, a la fecha, el más indicado para obtener de forma confiable los valores más bajos (en comparación con otros métodos) de la máxima corriente de cortocircuito prevista y con ellos, realizar una optimización tanto económica como de peso en la selección de los equipos de maniobra y protección.

✍ La metodología desarrollada en este trabajo está orientada hacia la especificación de las capacidades de corte y de cierre de los dispositivos de interrupción y hacia la coordinación de protecciones, que son las intenciones de la norma IEC 61363-1.

✍ Los resultados del cálculo de corrientes de cortocircuito en el sistema eléctrico de la Fragata “ARC independiente” mostraron que el sistema puede operar con seguridad utilizando interruptores con una capacidad de corte (I_{cu}) de 30KA y una capacidad de cierre (I_{cm})de 63 KA.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE. Recommended Practice for Electrical Installations on Shipboard. IEEE Std 45-2002. Estados Unidos, IEEE, 2002.
- [2] OMI. SOLAS (Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar). Edición refundida de 2001.
- [3] IEC. Electrical Instalation of Ships and Mobile and Fixed Offshore Units Part 1: Procedure for calculating short-circuit currents in three phase AC. IEC, 1998.

[4] DC MARITIME TECHNOLOGIES. All you want to know about short-circuits but were afraid to ask: Design Review, 2000.

[5] JIMÉNEZ, Víctor Hugo. Introducción a los sistemas eléctricos en buques.