

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE BARRAS PRINCIPAL
CONTRA LOS EFECTOS DE LA CORRIENTE DE
CORTOCIRCUITO EN BAJA TENSIÓN**

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:
JOSÉ HERNÁN FLORES PANDURO**

PROMOCIÓN 2005-I

LIMA – PERÚ

2010

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE BARRAS PRINCIPAL
CONTRA LOS EFECTOS DE LA CORRIENTE DE
CORTOCIRCUITO EN BAJA TENSIÓN**

A Dios, por su infinito amor, por darme fuerza a crecer cada día y por todas las oportunidades que me ha brindado durante mi vida.

A mi padre, por sus enseñanzas, su paciencia, su apoyo y por apostar por mí.

A mi madre, que desde el cielo ha acompañado cada paso importante de mi vida.

SUMARIO

El presente informe está organizado en cinco capítulos. En el primer capítulo se da un primer acercamiento al tema con una breve introducción, luego se muestran los antecedentes, se plantea el problema, se dan los objetivos y se delimitan los alcances.

En el segundo capítulo se expone el fundamento teórico en el cual se ubica el problema. En primer lugar se introducen las definiciones y conceptos básicos acerca de los cortocircuitos, luego se desarrollan las ecuaciones, tablas y gráficos relacionados al cálculo de los efectos de la corriente de cortocircuito.

En el tercer capítulo, se aborda la metodología de solución del problema desde un enfoque matemático y analítico. Se parte de las ecuaciones dadas en el capítulo 2, se obtienen nuevas relaciones y se ordenan los resultados en tablas. También, se da un conjunto de criterios que ayuden a mejorar o diseñar un Sistema de Barras Principal.

En el cuarto capítulo, se hace una presentación de los programas que se utilizarán en el presente informe: BUSBAR 865 v1.0 (programa elaborado para el presente informe) y SAP2000 v14 (programa de análisis estructural).

En el quinto capítulo, se muestra la aplicación de la metodología de la solución en dos ejemplos prácticos, en cada uno se hará una evaluación y se seleccionará aquella alternativa más conveniente desde el punto de vista técnico y económico.

Adicionalmente se complementará el presente informe con una serie de anexos que ayudarán a reforzar la comprensión del tema.

ÍNDICE

SUMARIO

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Introducción	2
1.2 Antecedentes	3
1.3 Identificación del problema	3
1.4 Objetivos	4
1.5 Alcances	4
CAPITULO II	
FUNDAMENTO TEÓRICO	5
2.1 Conceptos básicos de cortocircuito	5
2.1.1 Definición de cortocircuito	5
2.1.2 Tipos de cortocircuitos	5
2.1.3 Cortocircuito trifásico	6
2.1.4 Valores característicos de la corriente de cortocircuito	10
2.2 El Sistema de Barras Principal y sus componentes	11
2.2.1 Conductor	11
2.2.2 Aislador porta barras	11
2.2.3 Base de montaje	11
2.3 Cálculo de los efectos de la corriente de cortocircuito	12
2.3.1 Cálculo de los efectos mecánicos	13
2.3.2 Cálculo de los efectos térmicos	23
2.4 Interruptores automáticos	27
2.4.1 Interruptores automáticos limitadores de corriente	27
CAPITULO III	
METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	28
3.1 Resistencia mecánica de un conductor de sección rectangular	28
3.1.1 Sistema de barras de un sólo conductor por fase	28
3.1.2 Sistema de barras de dos o más conductores por fase	30
3.2 Resistencia térmica de un conductor de sección rectangular	33

3.3	Resistencia mecánica de los aisladores porta barras	34
3.4	Criterios para aumentar la capacidad de cortocircuito de un sistema de barras	34
3.4.1	Reubicación de los aisladores porta barras	35
3.4.2	Modo de empleo de los aisladores porta barras	35
3.4.3	Variación de la distancia entre fases	36
3.5	Criterios para el diseño de un Sistema de Barras Principal	36
3.5.1	Selección del material del conductor	36
3.5.2	Selección del conductor	36
3.5.3	Disposición de perfiles	37
3.5.4	Selección del tipo de aislador porta barras	38
3.5.5	Distancia entre aisladores porta barras	38
3.5.6	Distancia entre fases	38
3.5.7	Cantidad de espaciadores	39
3.5.8	Duración de la corriente de cortocircuito	39

CAPITULO IV

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE BARRAS PRINCIPAL

4.1	Introducción	41
4.2	BUSBAR 865 versión 1.0	41
4.2.1	Carátula	41
4.2.2	Dat n = 1	42
4.2.3	Dat n > 1	42
4.2.4	Res n = 1	43
4.2.5	Res n > 1	43
4.2.6	Rep n = 1	44
4.2.7	Rep n > 1	45
4.2.8	Tablas	46
4.3	SAP2000 versión 14	46
4.3.1	Ingreso al programa (paso 1)	47
4.3.2	Selección de las unidades (paso 2)	47
4.3.3	Selección de la geometría del modelo (paso 3)	48
4.3.4	Asignación del tipo de apoyo (paso 4)	49
4.3.5	Definición del tipo de material (paso 5)	49
4.3.6	Definición de la sección (paso 6)	50
4.3.7	Definición y asignación de las cargas (paso 7)	51

4.3.8	Selección de la norma de diseño (paso 8)	52
4.3.9	Análisis (paso 9)	52
4.3.10	Resultados (paso 10)	54
CAPITULO V		
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN		56
5.1	Ejemplo 1	56
5.1.1	Datos del Sistema de Barras Principal estándar	56
5.1.2	Desarrollo del problema	57
5.1.3	Alternativas de solución	58
5.1.4	Resumen comparativo	60
5.2	Ejemplo 2	61
5.2.1	Concepción del problema	62
5.2.2	Resumen comparativo	65
5.2.3	Simulación de la alternativa elegida	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		68
ANEXOS		70
ANEXO A		
Algoritmo del programa BUSBAR 865 v1.0		71
ANEXO B		
Prueba del BUSBAR 865 v1.0, con un ejemplo de la norma IEC 60865 – 2		74
ANEXO C		
Fórmula de generación de algunas gráficas		79
ANEXO D:		
Lista de ecuaciones utilizadas		80
ANEXO E:		
Protocolos de prueba de aisladores cónicos		85
BIBLIOGRAFÍA		100

PRÓLOGO

En la actualidad, el concepto de seguridad industrial (seguridad de las personas y los bienes) ha tomado mucha importancia. En una instalación eléctrica la búsqueda de la seguridad recae en sus componentes, por lo tanto, se requiere hacer estudios a fin de dominar desde el momento del diseño el comportamiento de los mismos, tomando en cuenta el entorno y las solicitudes que pueden presentarse durante su operación.

El diseño de un Sistema de Barras Principal que tenga una buena respuesta ante los efectos de la corriente de cortocircuito no es muy sencillo. Sin embargo, el problema es recurrente para un ingeniero que diseña Sistemas de Barras Principales, por lo tanto, es necesario que tenga un conjunto de alternativas de solución y herramientas computacionales que le ayuden.

El cálculo de los efectos de la corriente de cortocircuito es bastante amplio y complejo, debido a las diferentes secciones de conductor: circular, rectangular, tipo T, tipo H, etc. Y también a la diversidad de disposiciones de sistemas de barras: coplanar, triangular, desfasado, etc. Por lo tanto, el presente informe se limita a los alcances enumerados en el primer capítulo.

Luego, el objetivo general del presente informe, es elaborar un documento técnico que sirva de referencia para el diseño de un Sistema de Barras Principal contra los efectos de la corriente de cortocircuito en baja tensión; en forma detallada se puede ver en el capítulo 1.

Con respecto a la bibliografía consultada para desarrollar el presente informe, las normas ofrecieron la mayor información relacionada a los efectos de la corriente de cortocircuito: definiciones, conceptos, ecuaciones, tablas y gráficos. Los libros aportaron en menor porcentaje al tema, ya que estudiaban a la corriente de cortocircuito desde un punto de vista matemático y analítico.

Finalmente quiero agradecer al ing. Enrique Salazar Jaramillo, con quien trabajo actualmente en Manufacturas Eléctricas S. A., quien fue el que me impulso a estudiar profundamente el tema del cálculo de los efectos de la corriente de cortocircuito; facilitándome las normas e información necesaria, además de ayudarme a resolver mis dudas respecto al tema. También quiero agradecer al Ing. Tomas Palma García, mi Asesor, que sin sus observaciones y constantes aportes no hubiera podido desarrollar el tema en forma clara y didáctica.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Introducción

En redes de baja tensión, el problema de la respuesta a los efectos de la corriente de cortocircuito se centra en los circuitos de fuerza. Depende, sobretodo, de la intensidad de corriente de cortocircuito, de la forma de los conductores, de su disposición relativa y del sistema de fijación.

Los campos electromagnéticos son producidos alrededor de los conductores debido a la circulación de la corriente eléctrica a través de ellos. Donde tales campos interactúan entre conductores paralelos, induciéndose una fuerza electromagnética.

Si dicha fuerza es inducida por la corriente de cortocircuito se produce sobre los conductores, esfuerzos mecánicos y térmicos que tienen que ser tomados en cuenta, para el correcto dimensionamiento de los mismos.

El problema de mejorar o diseñar un Sistema de Barras Principal contra los efectos de la corriente de cortocircuito en baja tensión es elegir, de un conjunto de alternativas, aquella solución técnica que garantice un buen margen de seguridad sin que esto signifique un gran costo.

El costo de un Sistema de Barras Principal involucra, el costo de los insumos (conductor, aislador porta barras y base de montaje), la mano de obra por fabricación y la mano de obra por montaje.

En la Fig. 1.1, se puede apreciar un Sistema de Barras Principal montado dentro de un tablero eléctrico (cortesía de Rittal Corporation).



Fig. 1.1: Sistema de Barras Principal montado en una envoltente.

1.2 Antecedentes

En enero de 1961, entra en vigencia la norma alemana VDE 0103, en el cual se proponen un conjunto de ecuaciones, tablas y gráficos que permiten calcular los efectos de la corriente de cortocircuito en conductores rígidos.

Posteriormente, en 1986 y 1993, la Comisión Electrotécnica Internacional publica respectivamente la primera y segunda edición de la norma IEC 60865 – 1; en donde se desarrollan los procedimientos para calcular los efectos de la corriente de cortocircuito en conductores rígidos y flexibles.

Luego, en 1994, se publica la norma IEC 60865 – 2, en donde se muestran varios ejemplos de cálculo de los efectos de la corriente de cortocircuito, tanto para conductores rígidos como flexibles.

Finalmente, en 1997, se publica la norma DIN – EN 61660 – 2 (nueva edición de la VDE 0103), que recoge los procedimientos dados en la IEC 60865 – 1 de 1993, para el caso de conductores rígidos.

1.3 Identificación del problema

Bajo las condiciones de cortocircuito, las altas corrientes de falla producen fuerzas electrodinámicas entre los conductores. Estas fuerzas pueden alcanzar magnitudes de miles de kilogramos-fuerza por metro lineal. El presente informe plantea dos problemas:

Problema 1: Toda empresa que se dedica a diseñar, fabricar y vender tableros eléctricos, busca mejorar sus tiempos de producción y de entrega. Para ello, la empresa, prefabrica aquellos tableros (con sus respectivos Sistemas de Barras Principales) que tienen mayor salida, con características mecánicas y eléctricas definidas, convirtiéndose en un producto estándar.

Sin embargo, en algunos casos, el cliente solicita que el Sistema de Barras Principal del tablero eléctrico que va a adquirir, tenga una resistencia a los cortocircuitos mayor al definido en el estándar por el diseñador. Ante ello, se tiene que buscar soluciones que ayuden a mejorar la respuesta a los efectos de la corriente de cortocircuito del Sistema de Barras Principal.

Problema 2: Dada una red eléctrica de baja tensión, con la ayuda de un programa especializado se determina las corrientes de cortocircuito en cada punto de la red. Luego, un tablero eléctrico al ser instalado en algún punto de la red, a través de un interruptor u otro elemento de conmutación. El Sistema de Barras Principal del tablero eléctrico debe ser diseñado para resistir los efectos de la corriente de cortocircuito en dicho punto.

Por lo tanto, se requiere desarrollar varias alternativas de solución, posteriormente evaluarlos y escoger aquella que garantice un buen margen de seguridad, y además tenga un costo de fabricación y montaje económico.

1.4 Objetivos

El objetivo general del presente informe, es realizar un documento técnico que exponga los procedimientos para el diseño de un Sistema de Barras Principal contra los efectos de la corriente de cortocircuito en baja tensión. Al detalle se busca lo siguiente:

- Analizar las ecuaciones, tablas y gráficas dadas en las normas IEC 60865 – 1 y la DIN – EN 61660 – 2. Para determinar si, la disposición horizontal o vertical es la alternativa más conveniente para resistir los esfuerzos de cortocircuito, y en qué medida el uso de espaciadores contribuyen a la mejora de la resistencia mecánica.
- Mostrar alternativas de solución que ayuden a mejorar la capacidad de cortocircuito de un Sistema de Barras Principal.
- Proponer criterios que ayuden al diseño de un Sistema de Barras Principal contra los efectos de la corriente de cortocircuito.
- Elaborar un programa basado en la norma IEC 60865 – 1, que ayude a calcular los efectos de la corriente de cortocircuito en un Sistema de Barras Principal.
- Dar pautas de cómo utilizar el programa SAP2000 versión 14, para verificar los cálculos hechos por el programa del punto anterior.

1.5 Alcances

El cálculo de los efectos de la corriente de cortocircuito en los conductores es amplio y complejo, por lo tanto, el presente informe tiene los siguientes alcances:

- La mayor parte del fundamento teórico y del análisis está basado según las normas IEC 60865 – 1 – 1993 y la DIN – EN 61660 – 2 – 1997.
- Solamente se considera el caso de los cortocircuitos trifásicos balanceados.
- Los conductores que se estudian son rígidos y de sección rectangular.
- Sólo se considera conductores en disposición coplanar.
- Se estudia al Sistema de Barras Principal como parte de un tablero eléctrico.
- No se toma en cuenta las perturbaciones de los componentes metálicos del entorno.
- No se toma en cuenta el efecto de proximidad entre barras.
- En el cálculo de los efectos térmicos se considera el efecto pelicular para conductores principales mayores a 600 mm^2 .
- La evaluación técnica de las alternativas de solución se hará comparando los márgenes de seguridad de los esfuerzos mecánicos y térmicos respectivamente.
- La evaluación económica de las alternativas de solución toma en cuenta los costos de los componentes del Sistema de Barras Principal y el costo de montaje.
- Los cálculos y simulación se harán con la ayuda del programa elaborado para el presente informe y el SAP2000 versión 14.

CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Conceptos básicos de cortocircuito

Los conceptos relacionados a los cortocircuitos son tratados en las directrices de la norma IEC 60909. Esta norma es aplicable para todas las redes trifásicas (radial o malla) desde baja tensión hasta el nivel de 230kV.

2.1.1 Definición de cortocircuito

Es la unión accidental o intencional entre dos o más partes conductoras, forzando las diferencias de potencial eléctrico de estas partes a ser igual o cercano a cero [1].

2.1.2 Tipos de cortocircuitos

Según la norma IEC 60909, en los sistemas trifásicos se conocen básicamente cuatro tipos de cortocircuitos, que se muestran y designan en la Fig. 2.1 (Fig. 13.1/1 [4]), junto con las respectivas corrientes de cortocircuito.

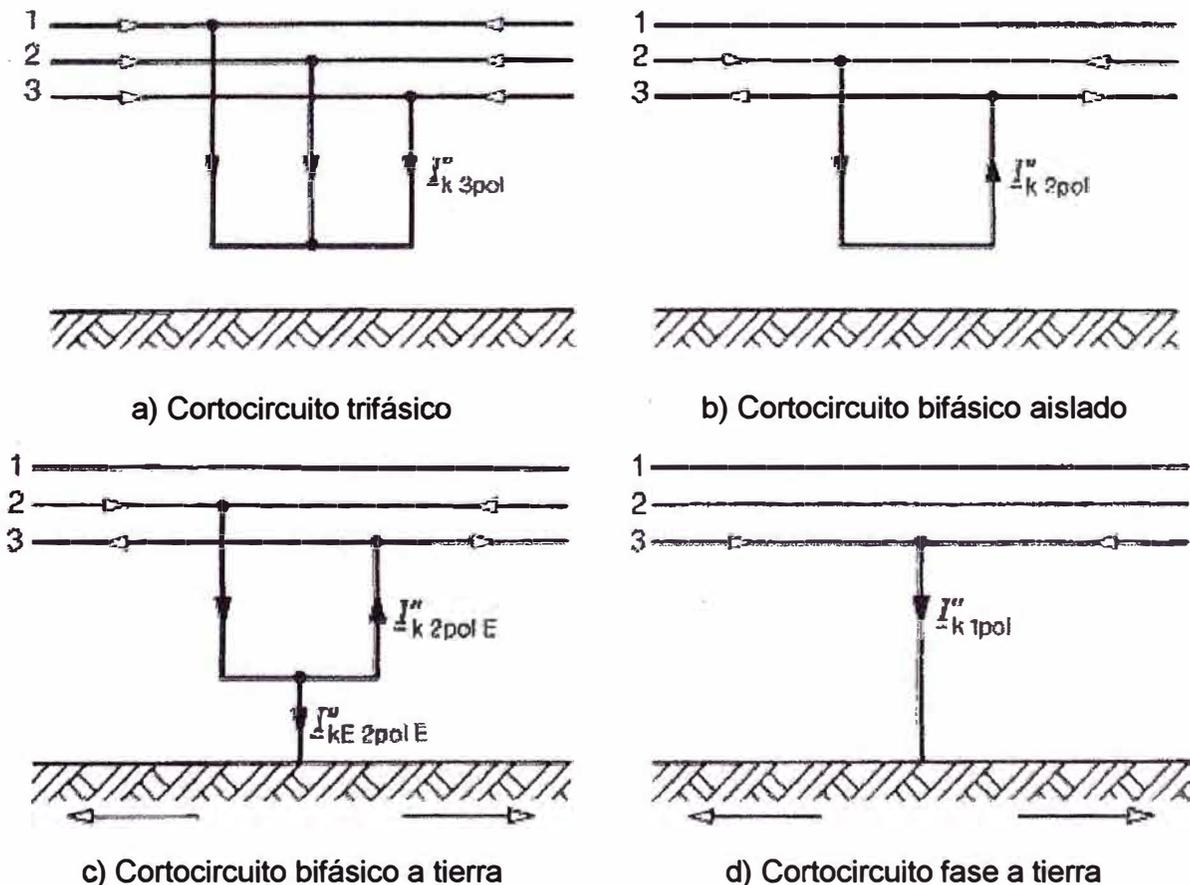


Fig. 2.1: Tipos de cortocircuito (el sentido de las flechas es arbitrario).

Haciendo referencia a las estadísticas de ocurrencia de fallas, la falla más común es el cortocircuito de fase a tierra, representa aproximadamente el 70% del total de casos de fallas en un sistema de potencia [2], el cortocircuito bifásico aislado y bifásico a tierra son 12% y 10% respectivamente, y el cortocircuito trifásico es el 8% de los casos [3].

El cortocircuito trifásico representa el caso más severo para los circuitos de fuerza, es por esa razón que las normas eléctricas establecen que, para probar un equipo o sistema de barras contra los efectos de la corriente de cortocircuito, se utilice una falla trifásica, ya que es la única que provoca los mayores esfuerzos mecánicos y térmicos.

2.1.3 Cortocircuito trifásico

El cortocircuito trifásico en régimen balanceado, es fácil de comprender y calcular, las tres tensiones se anulan en el punto de falla, y la corriente alterna de cortocircuito se distribuye simétricamente en los tres conductores. El conductor a tierra no participa en la transmisión de la corriente de cortocircuito. Aún en el caso de que el punto estrella de la red, en el que se produce el cortocircuito trifásico, estuviese conectado a tierra, no se producirían otras corrientes de cortocircuito. Por ese motivo el cálculo de las corrientes de cortocircuito puede efectuarse para un solo conductor [4].

Para analizar el comportamiento de la corriente de cortocircuito trifásica en una red de baja tensión (cuando el cortocircuito ocurre lejos del generador) se utiliza un circuito monofásico simplificado. El circuito está formado por una fuente de tensión E alterna, un interruptor S , una impedancia Z_{cc} , que representa a todas las impedancias aguas arriba del interruptor y una impedancia Z_L de carga; ver Fig. 2.2. Cuando el interruptor está cerrado, por el circuito circula una corriente de servicio I_s .

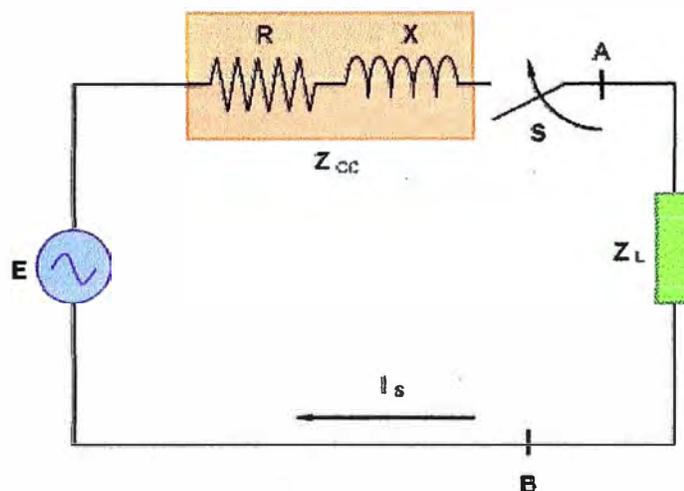


Fig. 2.2: Circuito simplificado de una red.

Cuando se produce una falla de impedancia despreciable entre los puntos A y B, como se observa en la Fig. 2.3, aparece una corriente de cortocircuito I_{cc} muy elevada, y limitada únicamente por la impedancia Z_{cc} .

Luego, la corriente de cortocircuito se establece siguiendo un régimen transitorio en función de la reactancia $X = \omega L$ y de la resistencia R , que son los componentes de la impedancia de cortocircuito Z_{cc} .

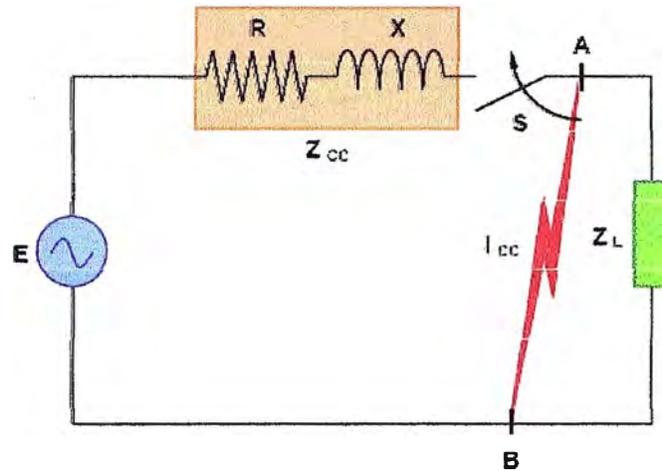


Fig. 2.3: Circuito simplificado de una red durante un cortocircuito.

Aplicando la ley de tensiones de Kirchhoff, en el circuito monofásico se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\sqrt{2}E \text{sen}(\omega t + \alpha) = \frac{X}{\omega} \frac{dI_{cc}}{dt} + R I_{cc} \quad (2.1)$$

donde α es el ángulo de establecimiento, que corresponde al desfase en el tiempo entre un cero de la onda de tensión y el instante de establecimiento del cortocircuito. Esto supone que la corriente antes del cierre del interruptor (establecimiento del cortocircuito) es cero, puesto que el valor de la corriente de servicio I_s es despreciable. La solución de la ecuación diferencial (2.1) da como resultado una solución homogénea:

$$I_a = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \text{sen}(\omega t + \alpha - \varphi); \quad \varphi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad (2.2)$$

y una solución particular:

$$I_c = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \text{sen}(\varphi - \alpha) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \quad (2.3)$$

por lo tanto la corriente de cortocircuito es:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \left[\text{sen}(\omega t + \alpha - \varphi) - \text{sen}(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \right] \quad (2.4)$$

En la Fig. 2.4 (Figura 4-2 [14]), se puede observar el comportamiento en el tiempo de la corriente de cortocircuito, también se aprecia los componentes alterno (tiene forma sinusoidal) y continuo (tiene forma exponencial).

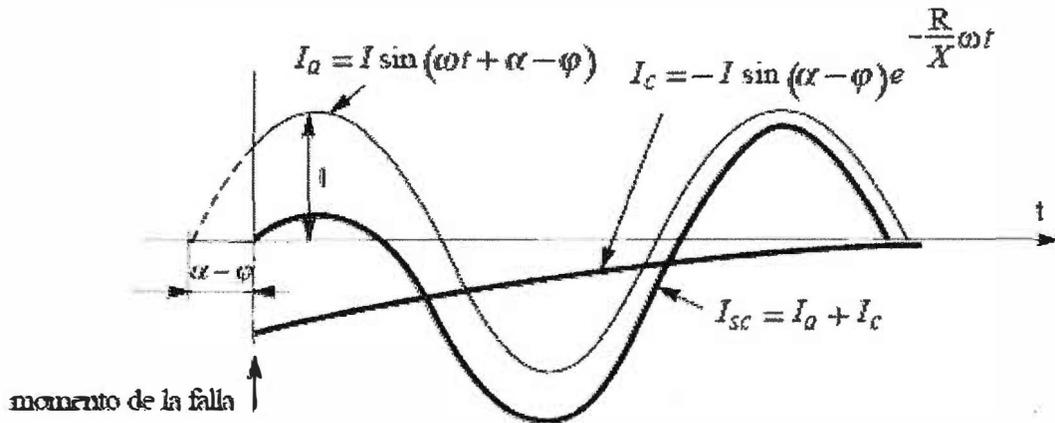


Fig. 2.4: Componentes alterno y continuo de la corriente de cortocircuito.

El análisis de la expresión entre corchetes de la ecuación (2.4), al que llamaremos κ , permite definir la característica de simetría o asimetría de la corriente de cortocircuito.

$$\kappa = \text{sen}(\omega t + \alpha - \varphi) - \text{sen}(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \quad (2.5)$$

Para el caso simétrico $\alpha = \varphi$, la corriente de cortocircuito tiene la forma de una sinusoidal pura, ver Fig. 2.5.

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \text{sen}(\omega t) \quad (2.6)$$

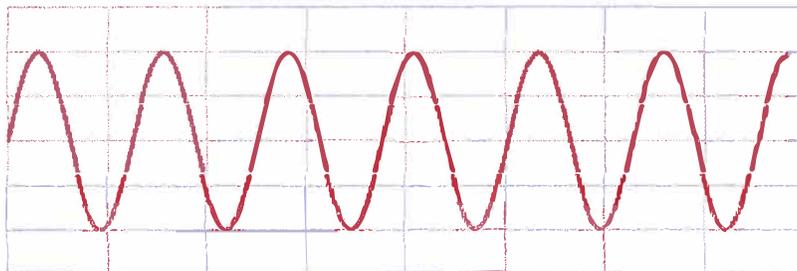


Fig. 2.5: Corriente de cortocircuito en régimen simétrico.

Para el caso asimétrico $\alpha - \varphi = \pi/2$, la corriente de cortocircuito alcanza un valor pico, ver en la Fig. 2.6, y luego decrece hasta alcanzar un valor permanente.

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \left[\text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \right] \quad (2.7)$$

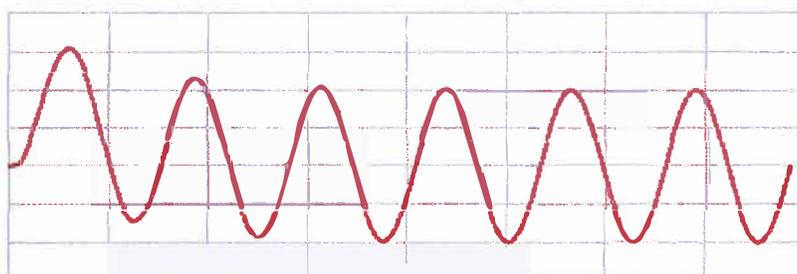


Fig. 2.6: Corriente de cortocircuito en régimen asimétrico.

En la ecuación (2.7) vemos que la corriente de cortocircuito toma su máximo valor (el valor pico de corriente) cuando $\omega t = \pi$, luego:

$$\kappa = 1 + e^{-\frac{\pi R}{X}} \quad (2.8)$$

Dando valores a R/X en la ecuación (2.8), se obtiene el gráfico que se ve en la Fig. 2.7. La norma IEC 60909, propone la siguiente fórmula para calcular el factor κ .

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \quad (2.9)$$

En la Fig. 2.8, se comparan las dos curvas. La desviación máxima respecto al valor teórico es de 2,63% (para $R/X = 0,652$).

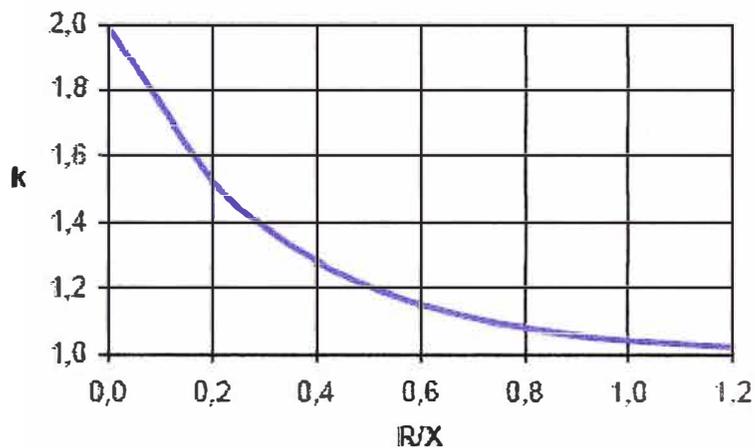


Fig. 2.7: Curva teórica del factor κ .

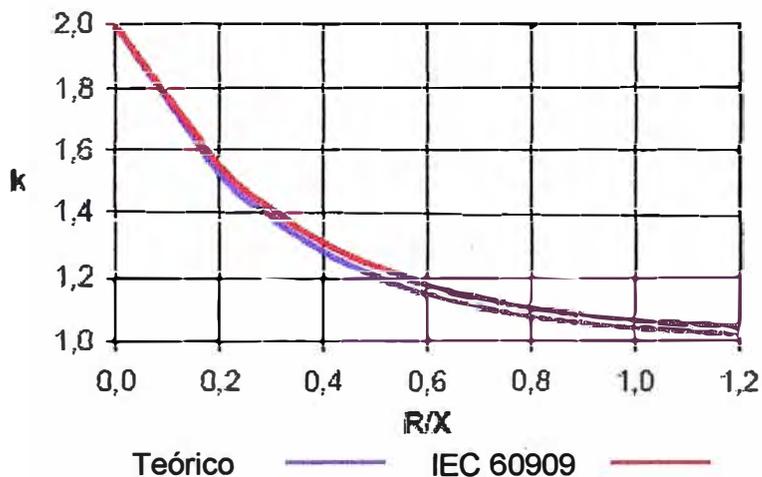


Fig. 2.8: Comparación de la curva teórica con la curva IEC 60909.

La ecuación (2.4), representa la corriente de cortocircuito en la fase 1 y se puede escribir de la siguiente forma:

$$I_{cc1} = \sqrt{2} I_k'' \left[\text{sen}(\omega t + \alpha - \varphi) - \text{sen}(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \right] \quad (2.10)$$

Tomando en cuenta el desfase relativo entre las corrientes, se tiene que reemplazar el valor de α por los valores $(\alpha + 2\pi/3)$ y $(\alpha - 2\pi/3)$ en la ecuación (2.10) para obtener las corrientes de cortocircuito de las fases 2 y 3 respectivamente.

$$I_{cc2} = \sqrt{2}I_k'' \left[\text{sen}(\omega t + \alpha + \frac{2}{3}\pi - \varphi) - \text{sen}(\alpha + \frac{2}{3}\pi - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \right] \quad (2.11)$$

$$I_{cc3} = \sqrt{2}I_k'' \left[\text{sen}(\omega t + \alpha - \frac{2}{3}\pi - \varphi) - \text{sen}(\alpha - \frac{2}{3}\pi - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \right] \quad (2.12)$$

La Fig. 2.9, muestra el comportamiento de las tres corrientes de fases en el momento que ocurre un cortocircuito trifásico.

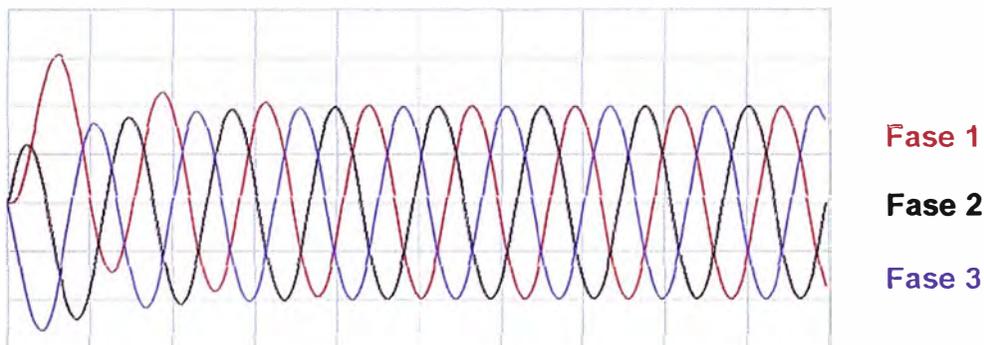


Fig. 2.9: Las corrientes de fases durante un cortocircuito trifásico.

2.1.4 Valores característicos de la corriente de cortocircuito

En la Fig. 2.10, se ven los valores característicos de la corriente de cortocircuito alejado del generador.

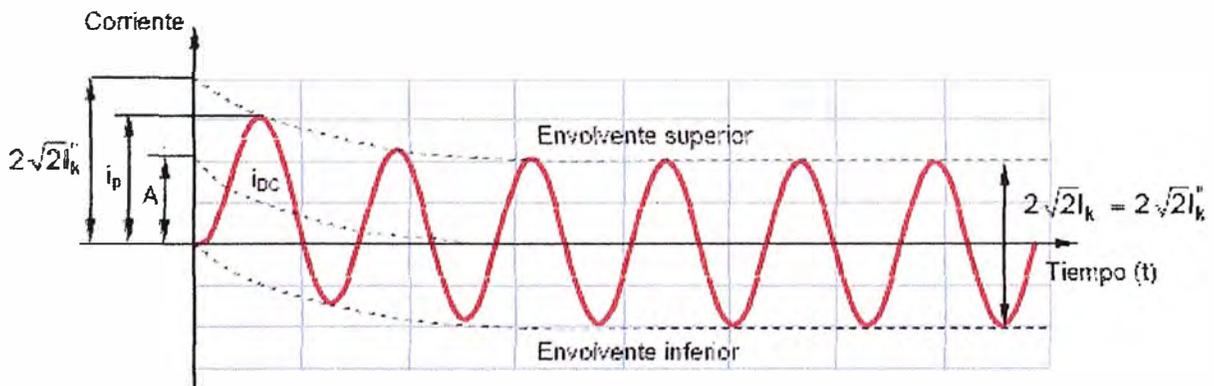


Fig. 2.10: Cortocircuito alejado del generador.

Donde:

I_k'' : Corriente inicial alterna de cortocircuito (valor eficaz).

I_p : Corriente pico de cortocircuito.

I_k : Corriente de cortocircuito en estado permanente (valor eficaz).

i_{DC} : Componente continuo de la corriente de cortocircuito.

A : Valor inicial del componente continuo.

2.2 El Sistema de Barras Principal y sus componentes

En una típica red trifásica de distribución de baja tensión como se muestra en la Fig. 2.11, se puede apreciar la participación de varios tipos de tableros eléctricos (tablero general, tablero de distribución, etc.) en donde cada uno cumple la función específica de servir de nexo entre la red de energía y los diferentes tipos de cargas.

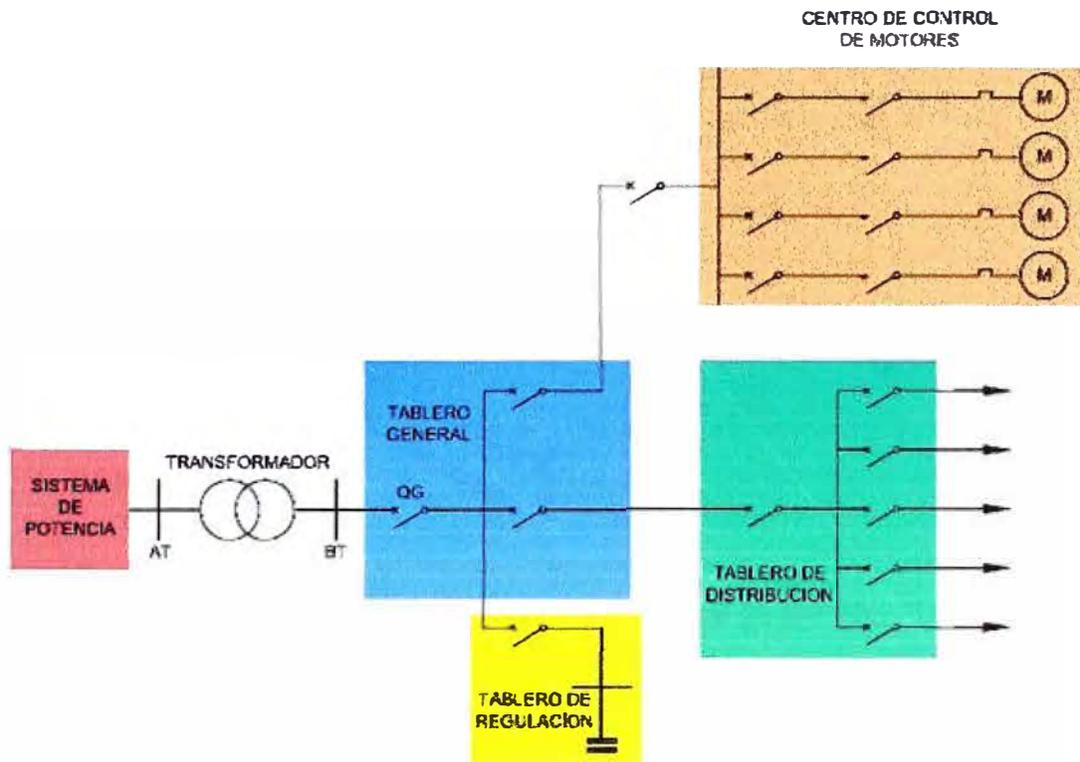


Fig. 2.11: Típica red de distribución de BT.

La distribución de la energía en los tableros eléctricos se hace a través del Sistema de Barras Principal que está constituido por un conjunto de conductores rígidos agrupados en fases (R – S – T o R – S – T – N), sujetos fijamente por aisladores porta barras e instalado sobre una base de montaje, ver Fig. 2.12.

2.2.1 Conductor

Elemento por el cual se realiza la distribución de la energía eléctrica, normalmente el material usado es el cobre electrolítico (99.9% IACS), sin embargo, hay casos donde se usan aleaciones de aluminio (Ej. AlMgSi0.5). En la Tabla N° 2.1, se observa los valores típicos de las propiedades físicas de los materiales de los conductores.

2.2.2 Aislador porta barras

Elemento que cumple las funciones de: sujetar al conductor (función mecánica) y aislar eléctricamente al conductor de la base metálica de montaje (función eléctrica).

2.2.3 Base de montaje

Estructura metálica en la cual se monta al conjunto de conductores dispuestos en fases y sujetos por aisladores porta barras.

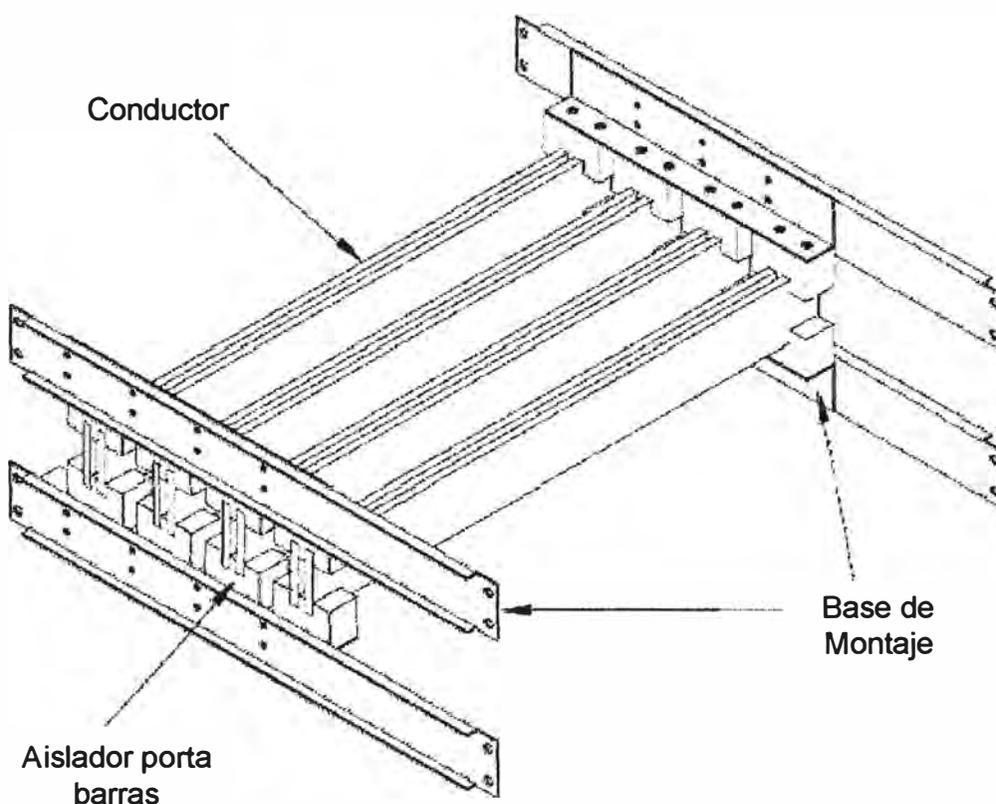


Fig. 2.12: Sistema de Barras Principal (R-S-T-N).

Tabla Nº 2.1: Propiedades físicas de los materiales de los conductores

Material	Modulo de elasticidad E (N/mm ²)	Límite de Fluencia R _{p0.2} (N/mm ²)		Conductividad a 20°C σ (m/Ωmm ²)
		min.	máx.	
E-Cu-F20	11x10 ⁴		120	57
E-Cu-F25		200	290	56
E-Cu-F30		250	360	56
E-Cu-F37		330	400	55
E-Al Mg Si 0.5-F17	7x10 ⁴	120	180	32
E-Al Mg Si 0.5-F22		160	240	30

2.3 Cálculo de los efectos de la corriente de cortocircuito

Las fuerzas electromagnéticas que actúan en los conductores paralelos son producidas por la interacción entre las corrientes y sus campos magnéticos. Para el caso de un cortocircuito, estas fuerzas son particularmente altas. Es por eso que los sistemas de barras no deben ser diseñados para la corriente de servicio sino para resistir el máximo valor esperado de la corriente de cortocircuito.

El cálculo de los efectos (mecánicos y térmicos) de la corriente de cortocircuito en conductores rígidos son descritos en las normas IEC 60865 – 1 [5] y DIN – EN 61660 – 2 (VDE 0103) [6].

2.3.1 Cálculo de los efectos mecánicos

Su determinación es necesaria para dimensionar mecánicamente los conductores y los aisladores porta barras.

a) Cálculo de las fuerzas electromagnéticas

a.1) Cálculo de la fuerza pico entre los conductores principales

En un sistema trifásico con los conductores principales separados una misma distancia y dispuestos sobre un mismo plano, ver Fig. 2.13, la fuerza máxima actúa sobre el conductor principal central durante un cortocircuito trifásico y está dado por:

$$F_{m3} = \frac{\mu_o}{4\pi} \sqrt{3} i_{p3}^2 \frac{L}{a_m} \quad (2.13)$$

Donde:

i_{p3} : Valor pico de la corriente de cortocircuito trifásica (kA).

L : Distancia entre dos soportes adyacentes (m).

a_m : Distancia efectiva entre los conductores principales (m).

μ_o : Permeabilidad magnética en el vacío, $4\pi \times 10^{-7}$ N/A².

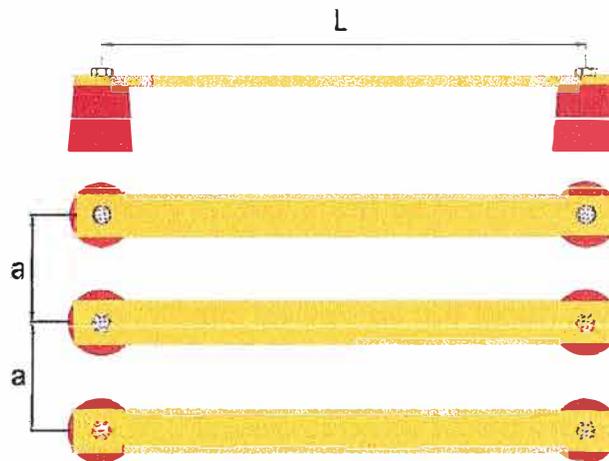


Fig. 2.13: Sistema de Barras Principal (R-S-T), un conductor por fase.

a.2) Cálculo de la fuerza pico entre los sub-conductores coplanares

En un Sistema de Barras Principal en el cual cada fase está formada por varios sub-conductores. La máxima fuerza actúa sobre los sub-conductores extremos y que está entre dos separadores adyacentes; ver en la Fig. 2.14. Esta fuerza está dado por:

$$F_s = \frac{\mu_o}{2\pi} \sqrt{3} \left(\frac{i_{p3}}{n_s} \right)^2 \frac{L_s}{a_s} \quad (2.14)$$

Donde:

i_{p3} : Valor pico de la corriente de cortocircuito trifásica (kA).

L_s : Distancia máxima entre dos espaciadores adyacentes (m).

a_s : Distancia efectiva entre sub-conductores (m).

n_s : Número de sub-conductores por fase.

μ_o : Permeabilidad magnética en el vacío, $4\pi \times 10^{-7}$ N/A².

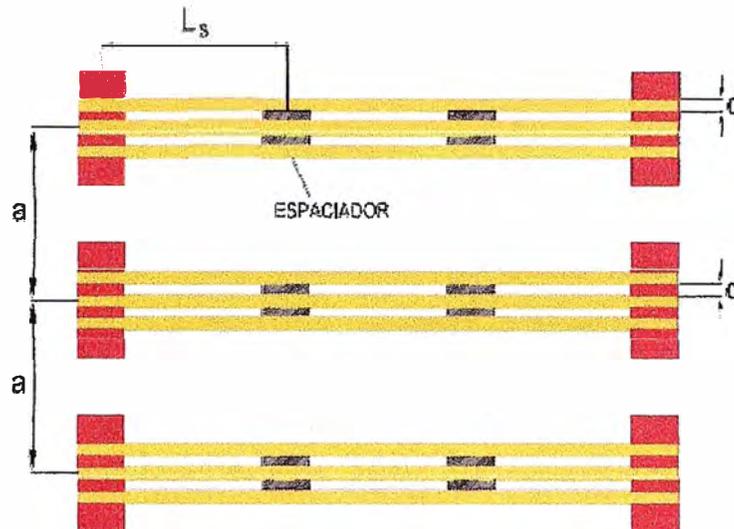


Fig. 2.14: Sistema de Barras Principal (R-S-T), tres conductores por fase.

Como vemos en las ecuaciones (2.13) y (2.14), se requiere conocer el valor pico de la corriente de cortocircuito, que depende del factor κ que a su vez es función la relación R/X cuyo valor, en muchos casos, no es fácil de conocer.

$$\frac{I_p}{I_k} = \sqrt{2}\kappa = n \quad (2.15)$$

En la Tabla 4 de la norma IEC 60439 – 1 [7], se dan los valores del factor n , que es la relación entre el valor pico y el valor eficaz de la corriente de cortocircuito; como se ve en la ecuación (2.15).

En la Tabla N° 2.2, se muestra los valores que toman n y κ según el valor eficaz de la corriente de cortocircuito.

Tabla N° 2.2: Valores de los factores n y κ .

Valor eficaz I (kA)	$\cos \phi$	n	κ
$I \leq 5$	0,70	1,5	1,1
$5 < I \leq 10$	0,50	1,7	1,2
$10 < I \leq 20$	0,30	2,0	1,4
$20 < I \leq 50$	0,25	2,1	1,5
$50 < I$	0,20	2,2	1,6

a.3) Distancia efectiva entre conductores principales y entre sub-conductores

La fuerza entre conductor recorridos por la corriente de cortocircuito dependen de la configuración geométrica y de la sección de los conductores. Por esa razón la distancia efectiva a_m entre los conductores principales tiene que ser introducido en la ecuación (2.13), y la distancia efectiva a_s entre los sub-conductores, en (2.14).

Para el caso de un conductor de sección rectangular por fase, se tiene que:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} \quad (2.16)$$

Para el caso de dos o más sub-conductores de sección rectangular por fase, se tiene que:

$$a_s = 1 \div \sum_{s=1}^{n_c} \frac{k_{1s}}{a_{1s}} \quad (2.17)$$

Los valores de k_{12} , k_{1s} y a_{1s} , son tomados del gráfico de la Fig. 2.15 (Figura 1 [5]), conocido como el ábaco de Dwight, que considera la influencia de la geometría de los conductores (ancho y espesor de la barra) y la distancia entre los ejes (distancia entre conductores y distancia entre sub-conductores).

Para generar cada curva de este gráfico por computadora, se tiene que ingresar valores a la ecuación mostrada en el Anexo C.

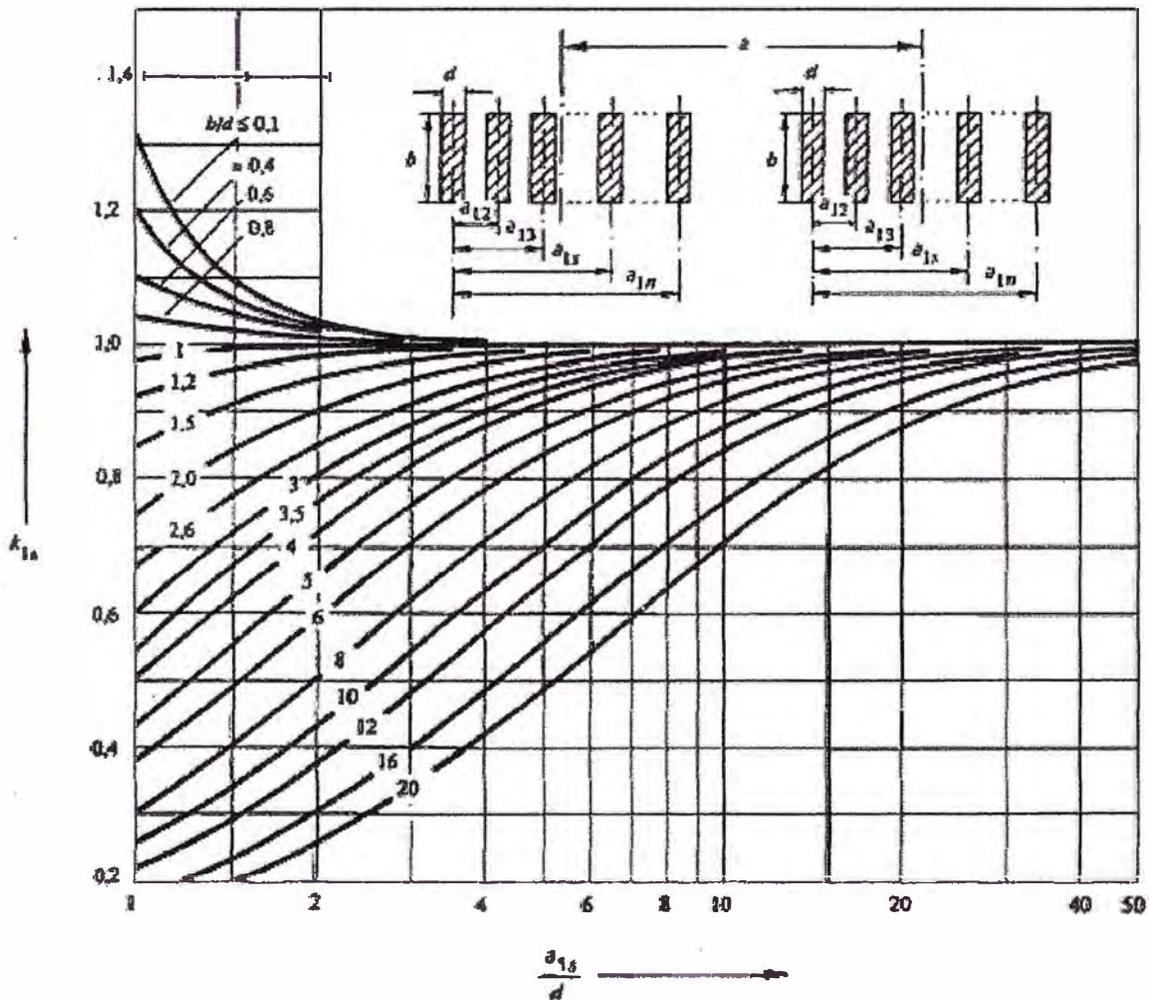
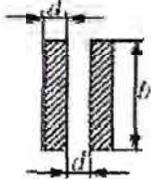
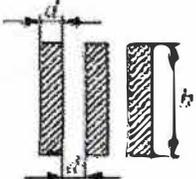
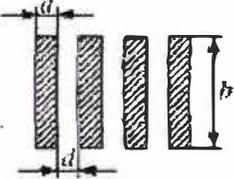
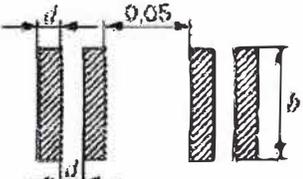


Fig. 2.15: Factor k_{1s} para calcular la distancia efectiva entre conductores.

Hay que aclarar que, el factor k_{1s} no toma en cuenta los fenómenos de efecto pelicular y de proximidad, que pueden modificar muy sensiblemente la distribución de corriente en el interior de los conductores, y complicar aún más las ecuaciones para calcular los efectos de la corriente de cortocircuito.

Los valores de a_s , también se pueden ser obtenidos de la Tabla N° 2.3 (Tabla 1 [5] y Tabla 4-3 [8]).

Tabla N° 2.3: Distancia efectiva a_s para conductores de una misma fase.

Configuración de barras	Espesor d (m)	Ancho de barra b (m)							
		0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20
	0,005	0,020	0,024	0,027	0,033	0,040	-	-	-
	0,010	0,028	0,031	0,034	0,041	0,047	0,054	0,067	0,080
	0,005	-	0,013	0,015	0,018	0,022	-	-	-
	0,010	0,017	0,019	0,020	0,023	0,027	0,030	0,037	0,043
	0,010	0,014	0,015	0,016	0,018	0,020	0,022	0,026	0,031
	0,005	-	0,014	0,015	0,018	0,020	-	-	-
	0,010	0,017	0,018	0,020	0,022	0,025	0,027	0,032	-

b) Cálculo de esfuerzos mecánicos en conductores rígidos y fuerzas en soportes

Los conductores pueden ser soportados de diferentes maneras, ya sea con soportes simples (permiten el movimiento angular en el punto de apoyo) o soportes fijos (no permiten movimiento angular en el punto de apoyo) o una combinación de ambos. Dependiendo del tipo de soporte y el número de ellos, los esfuerzos en los conductores y las fuerzas sobre los soportes serán diferentes para una misma corriente de cortocircuito; las ecuaciones dadas a continuación también incluyen la elasticidad de los soportes.

b.1) Cálculo de esfuerzos en conductores rígidos

La suposición que el conductor es rígido quiere decir que las fuerzas axiales son despreciables. Bajo esta suposición las fuerzas actuantes son fuerzas de flexión y la ecuación general de los esfuerzos de flexión causada por las fuerzas entre conductores principales está dada por:

$$\sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} L}{8Z} \quad (2.18)$$

Z es el módulo de sección del conductor principal y será calculado con respecto a la dirección de las fuerzas entre conductores principales. Los esfuerzos de flexión causados por las fuerzas entre sub-conductores está dado por:

$$\sigma_s = V_{os} V_{rs} \frac{F_s L_s}{16 Z_s} \quad (2.19)$$

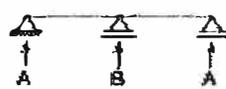
Z_s es el módulo de sección del sub-conductor y será calculado con respecto a la dirección de las fuerzas entre sub-conductores.

V_{σ} , V_{os} , V_r y V_{rs} son factores, los cuales toma en cuenta el fenómeno dinámico, y β es un factor que depende del tipo y número de soportes. Los máximos valores posibles de $V_{\sigma} V_{os}$ y $V_r V_{rs}$ son dados de la Tabla N° 2.4 (Tabla 2 [5]) y el factor β será tomado de la Tabla N° 2.5 (Tabla 3 [5]).

Tabla N° 2.4: Los valores máximos posibles de $V_{\sigma} V_r$, $V_{os} V_{rs}$

Tipo de cortocircuito	$V_{\sigma} V_r$ y $V_{os} V_{rs}$	
	Sin recierre automático	Con recierre automático
Línea a línea	1,0	-
Trifásico	1,0	1,8

Tabla N° 2.5: Factores α , β , y γ

Número de tramos y tipo de soportes		Factor α	Factor β^*	Factor γ
Un sólo tramo	A y B: simples 	A: 0,5 B: 0,5	1,2	1,57
	A: fijo B: simple 	A: 0,625 B: 0,375	0,73	2,45
	A y B: fijos 	A: 0,5 B: 0,5	0,5	3,56
Continuo con soportes simples equidistantes	2 tramos 	A: 0,375 B: 1,25	0,73	2,45
	3 o más tramos 	A: 0,4 B: 1,1	0,73	3,56

(*) Incluye los efectos de plasticidad.

Los factores α , β y γ también se les puede encontrar en la literatura relacionada con el análisis estructural, normas de diseño estructural y en manuales de acero o concreto (ASCE, UBC, Manual de Construcción en Acero, etc.).

b.2) Módulo de sección de conductores principales compuesto de sub-conductores

Los esfuerzos de flexión y consecuentemente la resistencia mecánica depende del módulo de sección. El módulo de sección de una superficie plana es igual al momento de inercia de la superficie plana respecto al eje que pasa por el centro de gravedad, dividido por la distancia del eje al borde más lejano (o punto más lejano) [9].

Si los esfuerzos ocurren de acuerdo a la Fig. 2.16 a), el módulo de sección Z es independiente del número de piezas de conexión y es igual a la suma de módulos de sección Z_s de los sub-conductores con respecto al eje $x - x$.

$$Z_{x-x} = \frac{1}{6} n_s db^2 \tag{2.20}$$

Si los esfuerzos ocurren según la Fig. 2.16 b), y en el caso que haya uno o ningún elemento de refuerzo dentro de una distancia soportada, el módulo de sección Z es igual a la suma de módulos de sección Z_s de los sub-conductores con respecto al eje $y - y$.

$$Z_{y-y} = \frac{1}{6} n_s bd^2 \tag{2.21}$$

donde n_s es el número de sub-conductores que forman el conductor principal.

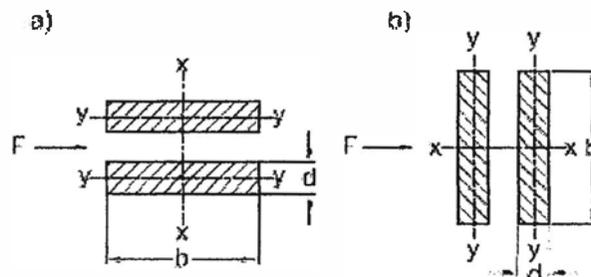


Fig. 2.16: Dirección de la fuerza de flexión.

Cuando dentro de una distancia soportada hay dos o más elementos de refuerzo, los módulos de sección Z_{y-y} son tomados en la Tabla N° 2.6 (Tabla 5 [5]).

Tabla N° 2.6: Módulo de sección con 2 ó elementos de refuerzo.

Sección rectangular	Z	Sección rectangular	Z
	$0,967 d^2 b$		$3,48 d^2 b$
	$1,98 d^2 b$		$1,73 d^2 b$

NOTA: Los elementos de refuerzo son los de color negro.

b.3) Esfuerzos permitidos en los conductores

Un solo conductor principal puede soportar los esfuerzos de flexión debido al paso de la corriente de cortocircuito cuando:

$$\sigma_m \leq 1,5R_{p0,2}(\text{min}) \quad (2.22)$$

Cuando un conductor principal está compuesto de dos o más sub-conductores, el esfuerzo total en el conductor principal está dado por:

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_m + \sigma_s \quad (2.23)$$

luego, reemplazando el valor de (2.23) en (2.22), se tiene:

$$\sigma_{\text{total}} \leq 1,5R_{p0,2}(\text{min}) \quad (2.24)$$

Es necesario verificar que el cortocircuito no afecte mucho la distancia entre los sub-conductores, por lo tanto un valor recomendable es:

$$\sigma_s \leq R_{p0,2}(\text{min}) \quad (2.25)$$

El valor de 1,5 de las ecuaciones (2.22) y (2.24), corresponde al factor q (factor de plasticidad) para conductores de sección rectangular.

b.4) Cálculo de las fuerzas en los soportes

La fuerza dinámica F_d , es la fuerza que soporta cada aislador porta barras durante un cortocircuito y será calculado de:

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (2.26)$$

Los máximos valores posibles de $V_F V_r$ son dados en la Fig. 2.17 (Tabla 2 [5]) y el factor α será tomado de la Tabla N° 2.5 (Tabla 3 [5]).

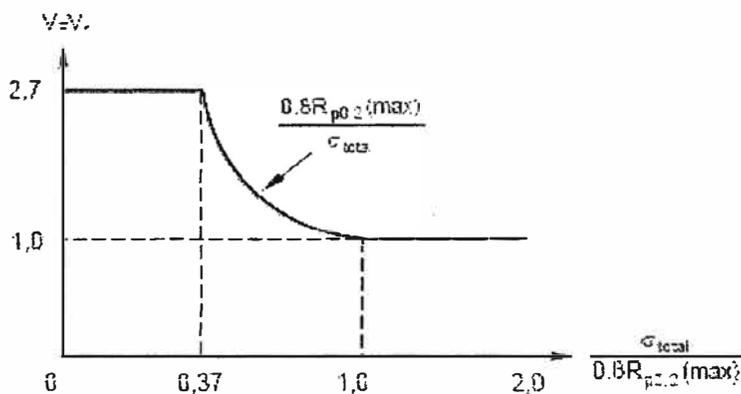


Fig. 2.17: Valores máximos posibles $V_F V_r$.

Para el límite de elasticidad de los materiales de los conductores $R_{p0,2}$, los estándares a menudo fijan rangos con valores mínimos y máximos. El valor mínimo será usado en las expresiones (2.22), (2.24) y (2.25), y el valor máximo en el gráfico de la Fig. 2.17. La fuerza F_D no debe exceder la fuerza máxima del aislador porta barras, cuyo dato es dado por el fabricante, normalmente en unidades de kgf.

c) Cálculo de la frecuencia natural característica y los factores V_{σ} , $V_{\sigma s}$, V_r , V_F y V_{rs}

c.1) Cálculo de la frecuencia natural característica

La frecuencia natural característica del Sistema de Barras Principal, se refiere a la frecuencia de vibración durante un cortocircuito y puede ser calculado de:

$$f_c = \frac{\gamma}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} \quad (2.27)$$

Donde:

E : Módulo de elasticidad (N/m^2).

L : Distancia entre dos soportes adyacentes (m).

J : Momento de inercia del conductor principal (m^4).

m' : Masa por unidad de longitud (kg/m).

γ : Factor que depende del tipo y número de soportes, ver Tabla N° 2.5.

Si el conductor principal está compuesto de sub-conductores, la frecuencia natural característica del conductor principal será calculado de:

$$f_c = c \frac{\gamma}{L^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \quad (2.28)$$

Donde:

E : Módulo de elasticidad (N/m^2).

L : Distancia entre dos soportes adyacentes (m).

J_s : Momento de inercia del sub-conductor (m^4).

m'_s : Masa por unidad de longitud de un sub-conductor (kg/m).

γ : Factor que depende del tipo y número de soportes, ver Tabla N° 2.5.

c : Factor de influencia de las piezas de conexión (o refuerzo).

El factor c será tomado de la Fig. 2.18 (Figura 3 [6]), según a la Tabla N° 2.7 [5]. En el caso que no haya separadores, $c = 1$. Los momentos de inercia J y J_s serán calculados de acuerdo a la dirección de los esfuerzos mostrados en la Fig. 2.16 a) y b).

$$J_{x-x} = \frac{1}{2} b Z_{x-x} \quad (2.29)$$

$$J_{y-y} = \frac{1}{2} d Z_{y-y} \quad (2.30)$$

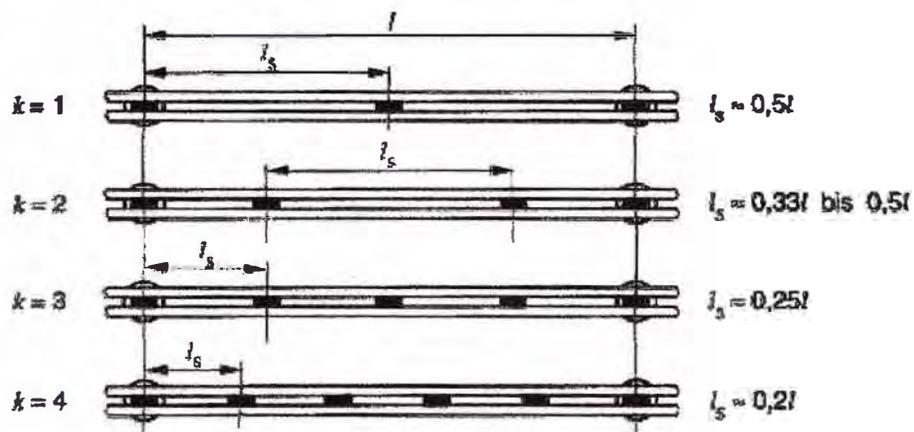
Para el cálculo del esfuerzo en el sub-conductor, tomando en cuenta la frecuencia natural característica en, la ecuación usada es:

$$f_{cs} = \frac{3.56}{L_s^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \quad (2.31)$$

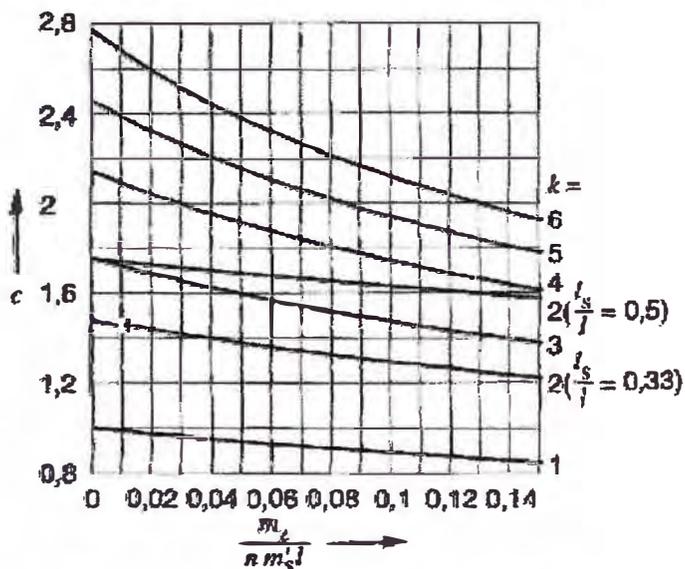
Donde:

L_s : Distancia máxima entre dos piezas de conexión adyacentes (m).

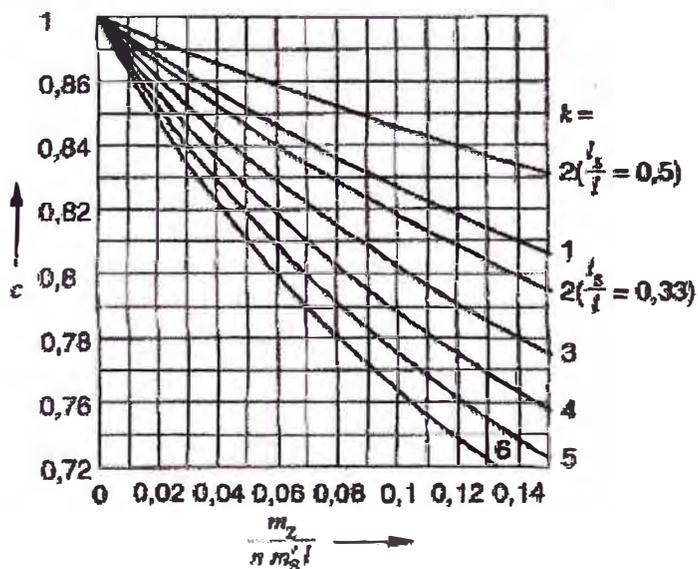
m'_s : Masa por unidad de longitud de un sub-conductor (kg/m).



a) Arreglo de piezas de conexión dentro del tramo soportado.



b) Piezas de conexión son elementos de fijación.



c) Piezas de conexión son elementos de separación (espaciadores).

Fig. 2.18: Factor c , influencia de las piezas de conexión.

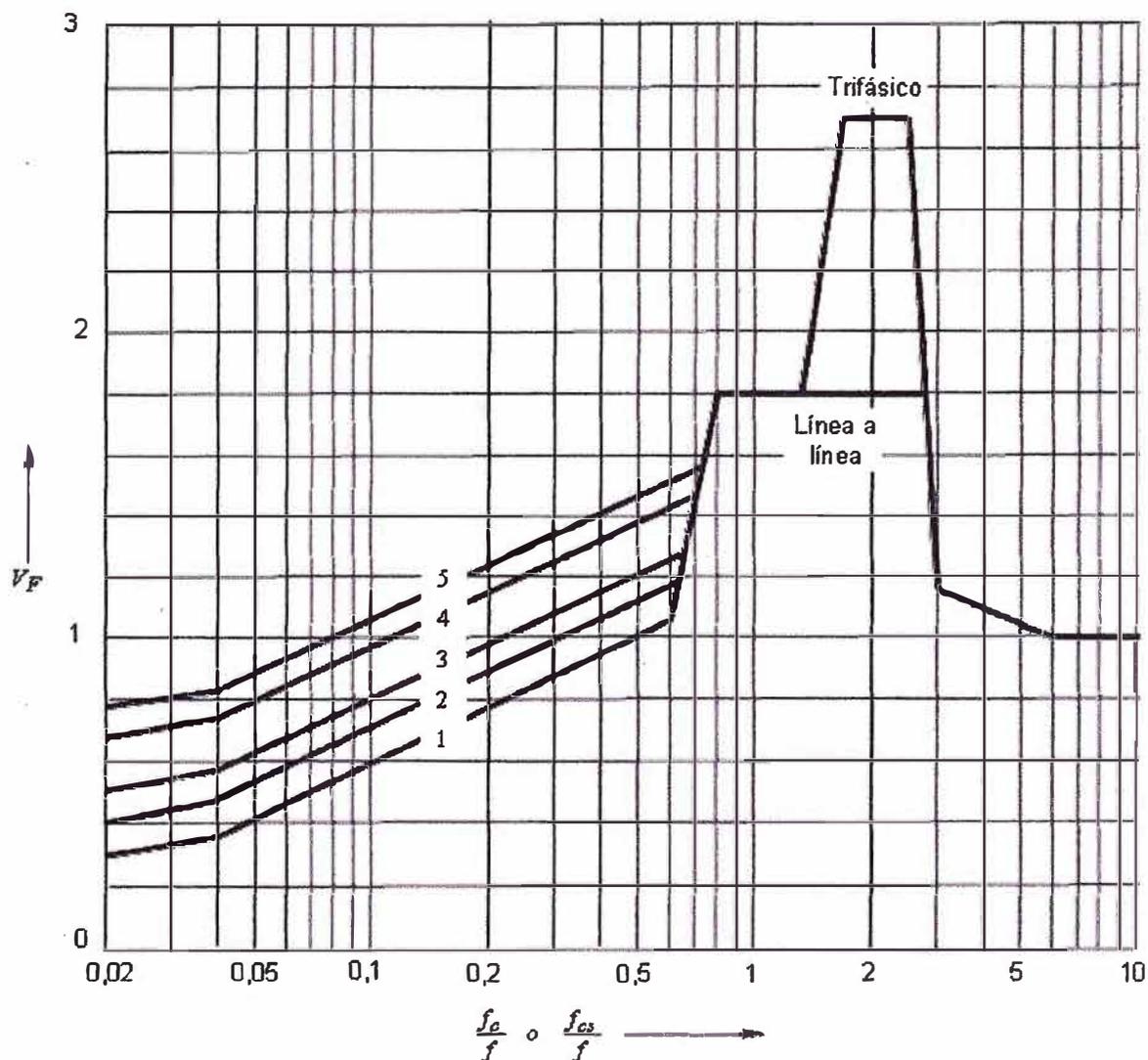
Donde, m_z es la masa total de un juego de piezas de conexión y N_s el número de sub-conductores.

Tabla Nº 2.7: Dirección de oscilación del sistema de barras.

	Dentro de un tamo hay	
	k elementos de fijación	k elementos de separación
	Factor c de	
Dirección de oscilación, perpendicular a la superficie	← ... →	Fig. 2.18 b) Fig. 2.18 c)
Dirección de oscilación, paralelo a la superficie	← ≡ ≡ ≡ →	Fig. 2.18 c) Fig. 2.18 c)

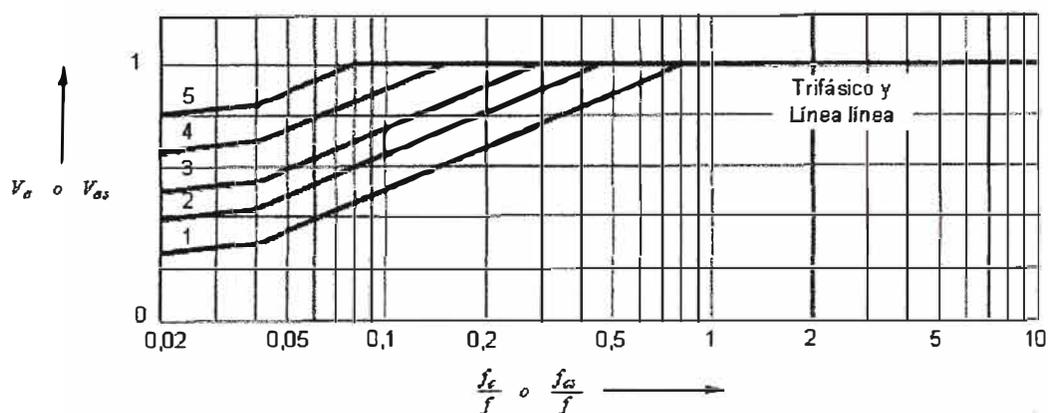
c.2) Los factores V_{σ} , $V_{\sigma S}$ y V_F

Los factores V_{σ} , $V_{\sigma S}$ y V_F como función de la relación f_0/f y f_{cs}/f , donde f es la frecuencia de la red, para el cálculo simplificado son obviados. Para un cálculo detallado se recurre a los gráficos de la Fig.2.19 (Figura 4 [5]).



a) Factor V_F para determinar las fuerzas en los soportes.

1: $\kappa \geq 1,60$ 2: $\kappa = 1,40$ 3: $\kappa = 1,25$ 4: $\kappa = 1,10$ 5: $\kappa = 1,00$



b) Factores V_{σ} y $V_{\sigma s}$ usados en cortocircuitos trifásicos y línea a línea.

1: $\kappa \geq 1,60$ 2: $\kappa = 1,40$ 3: $\kappa = 1,25$ 4: $\kappa = 1,10$ 5: $\kappa = 1,00$

Fig. 2.19: Factores V_{σ} , $V_{\sigma s}$ y V_F como funciones de la relación f_c/f y f_{cs}/f .

2.3.2 Cálculo de los efectos térmicos

El calentamiento debido a la corriente de cortocircuito, implica diversos fenómenos de características no lineales y otros factores que han sido obviados o aproximados para hacer posible un enfoque matemático. Para el propósito de esta sección las siguientes suposiciones han sido hechas:

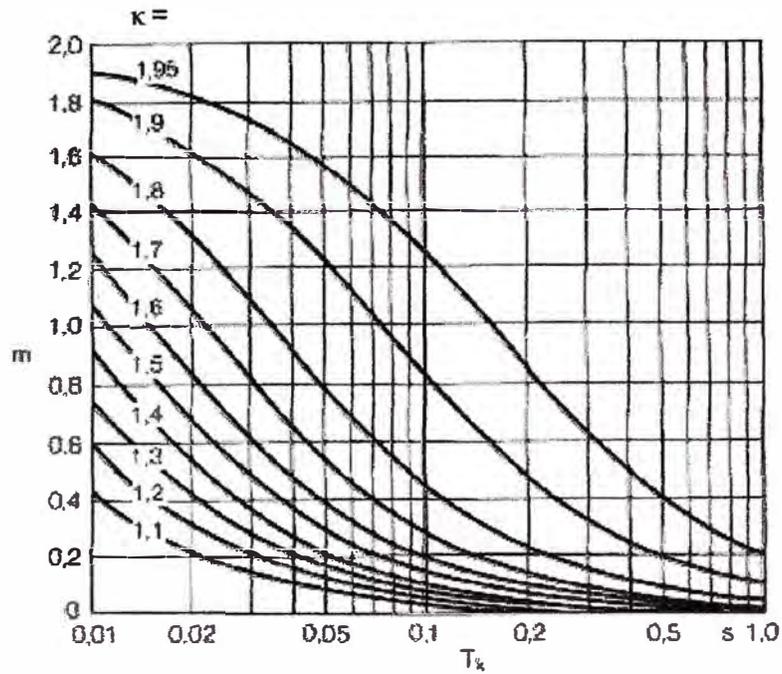
- El efecto pelicular (influencia magnética de un conductor en si mismo) y el efecto de proximidad (influencia magnética de conductores cercanos paralelos) no son tomados en cuenta.
- La característica resistencia – temperatura es asumida lineal.
- El calor específico del conductor es considerado constante.
- El calentamiento es considerado adiabático.

a) Cálculo del equivalente térmico de la corriente de cortocircuito

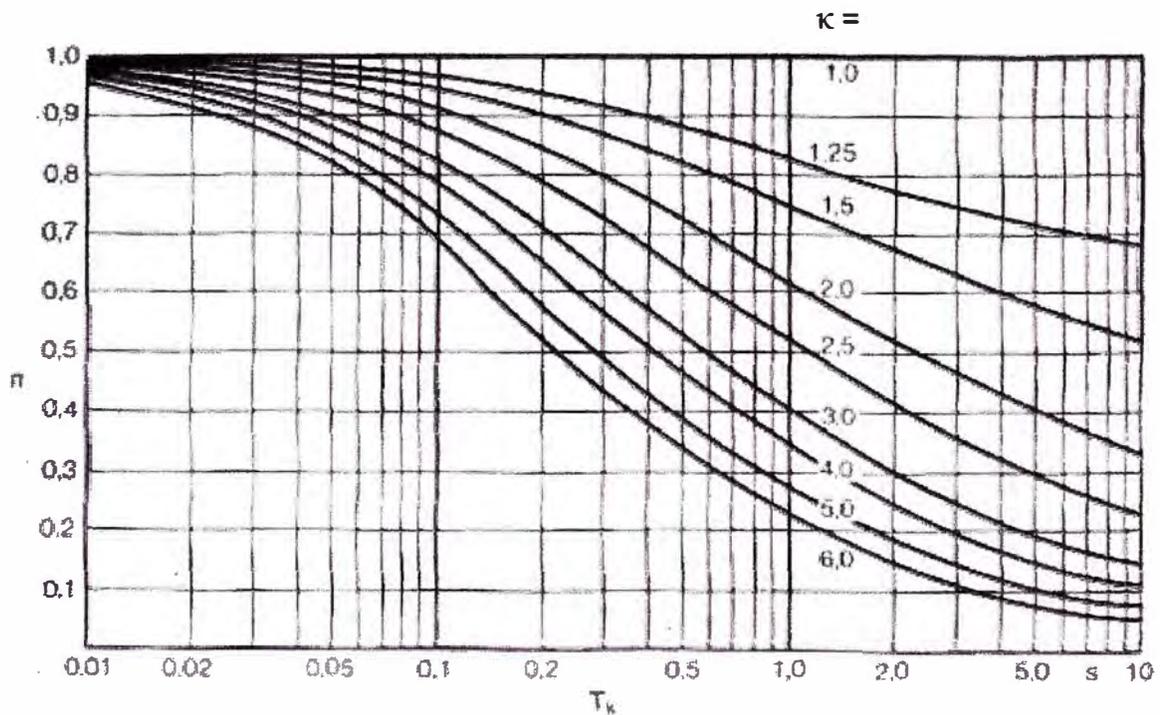
El equivalente térmico de la corriente de cortocircuito será calculado usando el valor eficaz de la corriente inicial de cortocircuito y los factores m y n para los efectos térmicos en función del tiempo para los componentes AC y DC de la corriente de cortocircuito. El equivalente térmico de la corriente de corta duración puede ser expresado por:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (2.32)$$

Los valores de m y n son dados en la Fig. 2.20 (Figura 12 [5]), como función de la duración de la corriente de cortocircuito. El valor de la corriente inicial de cortocircuito I_k'' permanece casi constante durante todo el tiempo de cortocircuito si se trata de un cortocircuito lejano del generador. Este es el caso normal de redes de baja tensión. Por lo tanto, puede decirse que en redes de baja tensión el valor de la corriente inicial alterna de cortocircuito es casi igual al valor de la corriente permanente de cortocircuito [10].



a) Factor m , disipación de calor debido al componente DC.



b) Factor n , disipación de calor debido al componente AC.

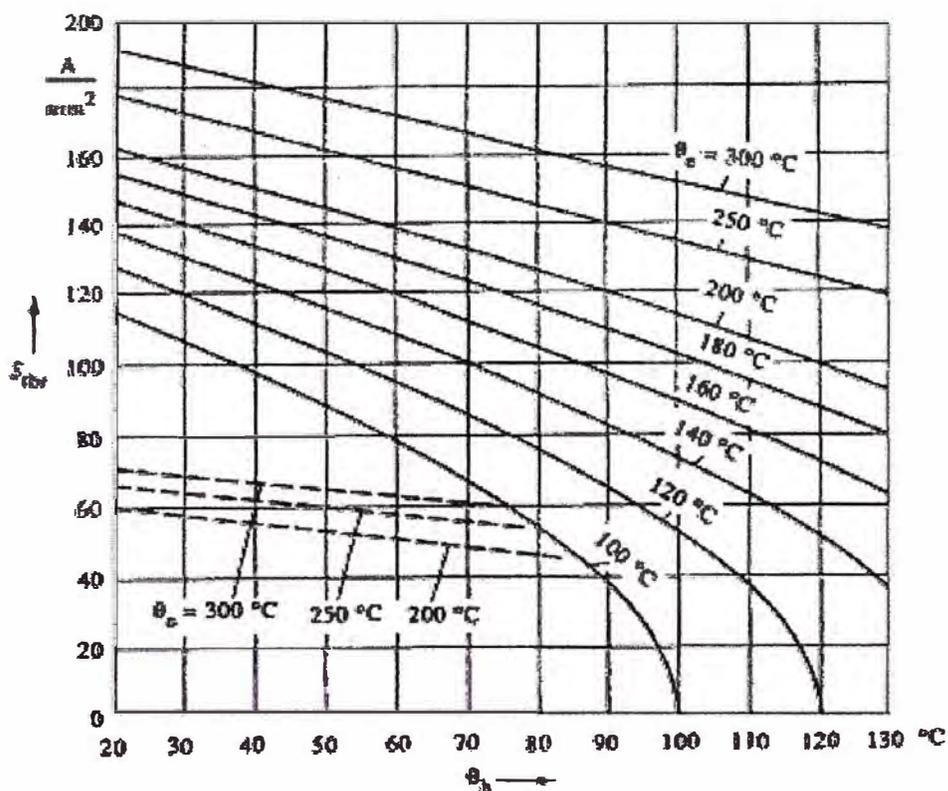
Fig. 2.20: Valores de los factores m y n .

Para redes de baja tensión (donde I_k es aproximada igual a I''_k) usualmente $n = 1$.

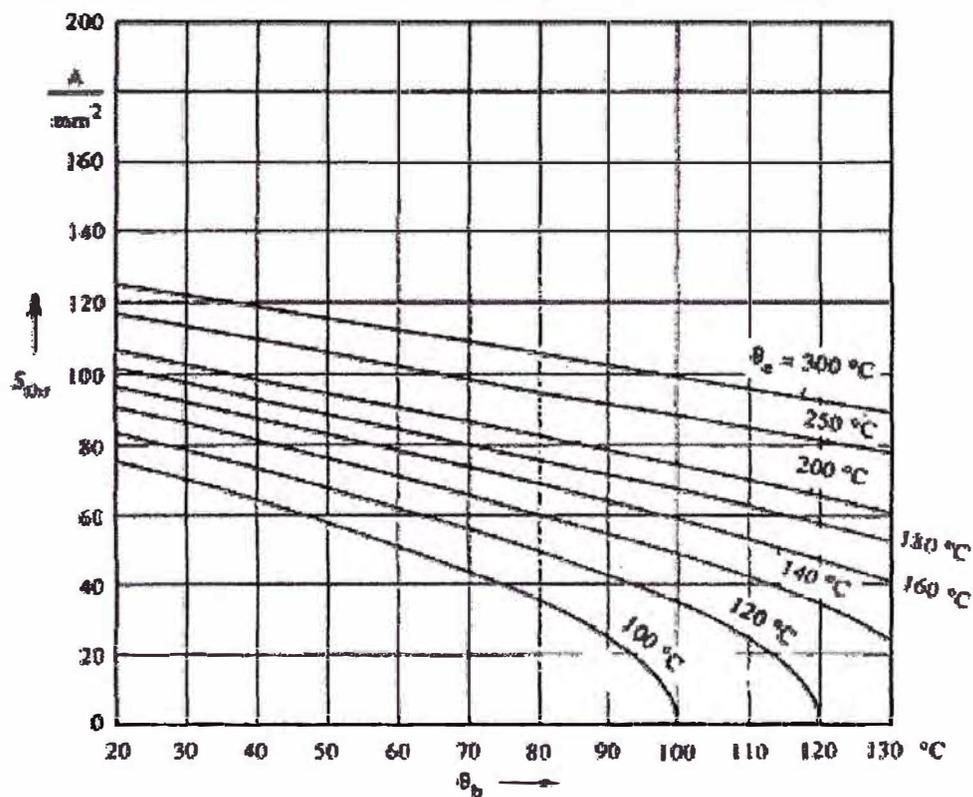
b) Cálculo del aumento de temperatura y de la densidad de corriente de corta duración nominal soportable para conductores

El aumento de temperatura de un conductor causado por un cortocircuito es una función de la duración de la corriente de cortocircuito, el equivalente térmico de la corriente de cortocircuito y del material del conductor.

Con el uso del gráfico de la Fig. 2.21 (Figura 10 [6]), es posible calcular el aumento de temperatura de un conductor, cuando la densidad de corriente de corta duración nominal soportable es conocida o viceversa.



a) Cobre (línea continua), acero de baja aleación (línea segmentada)



b) Aluminio, aleación de aluminio y ACSR.

Fig. 2.21: Densidad de corriente de corta duración nominal S_{th} para $T_{kr} = 1s$.

La temperatura de corta duración máxima recomendada para diferentes conductores son dados en la Tabla N° 2.8 (Tabla 6 [5]). Los conductores desnudos tienen suficiente esfuerzo térmico de cortocircuito cuando la densidad de corriente térmica equivalente de corta duración S_{th} satisface para todo valor de T_k , la siguiente relación:

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (2.33)$$

sabiendo que:

$$K = S_{thr} \sqrt{T_{kr}} \quad (2.34)$$

se reemplaza (2.34) en (2.33) y se obtiene la siguiente:

$$S_{th} \leq \frac{K}{\sqrt{T_k}} \quad (2.35)$$

En el anexo B de la norma IEC 60865 – 1, se muestra el valor de K en función de las temperaturas inicial y final de cortocircuito:

$$K = \sqrt{\frac{\kappa_{20} c \rho}{\alpha_{20}} \ln \frac{1 + \alpha_{20} (\theta_f - 20)}{1 + \alpha_{20} (\theta_i - 20)}} \quad (2.36)$$

Donde:

κ_{20} : Conductividad del conductor ($1/\Omega m$).

c : Calor específico del conductor ($J/kg^\circ C$).

ρ : Densidad del conductor (kg/m^3).

α_{20} : Coeficiente de temperatura para la resistividad a $20^\circ C$ ($1/^\circ C$).

θ_i : Temperatura al comienzo del cortocircuito ($^\circ C$).

θ_f : Temperatura al final del cortocircuito ($^\circ C$).

Tabla N° 2.8: Temperatura máxima recomendada para solicitaciones mecánicas para conductores durante un cortocircuito

Tipo de conductor	Temperatura máxima alcanzada por el conductor durante un cortocircuito
Conductores desnudos, sólido o trenzado: Cu, Al o aleación de Al.	200°C
Conductores desnudos, sólido o trenzado: Acero.	300°C

Para el caso de sistemas de barras de 2 ó más conductores por fase (cuya suma total es mayor a 600 mm^2), se debe considerar la distribución de corriente debido al efecto pelicular mostrada en la Tabla N° 2.9 [15].

Tabla N° 2.9: Distribución de corriente para 2 ó más conductores por fase.

N° de conductores por fase	II	III	II II
% de la corriente total	50:50	37:26:37	32:18:18:32

2.4 Interruptores automáticos

Según la norma IEC 60947 [11], es un aparato mecánico de conmutación capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito, así como de establecer, soportar durante un tiempo determinado e interrumpir corrientes en condiciones anormales del circuito tales como el cortocircuito.

De acuerdo a la capacidad para limitar la corriente de cortocircuito, los interruptores automáticos se dividen en dos tipos:

- Apertura de la corriente al pasar por cero.
- Limitador de corriente.

2.4.1 Interruptores automáticos limitadores de corriente

En el NEC 2008 [12] se define al interruptor limitador de corriente como un dispositivo que cuando interrumpe la corriente en su rango de limitación de la misma, reducirá el flujo de corriente en el circuito que ha fallado, hasta una magnitud considerablemente menor (ver Fig. 2.22) que la que se puede obtener en el mismo circuito si se reemplaza dicho dispositivo con un conductor macizo que tenga una impedancia comparable.

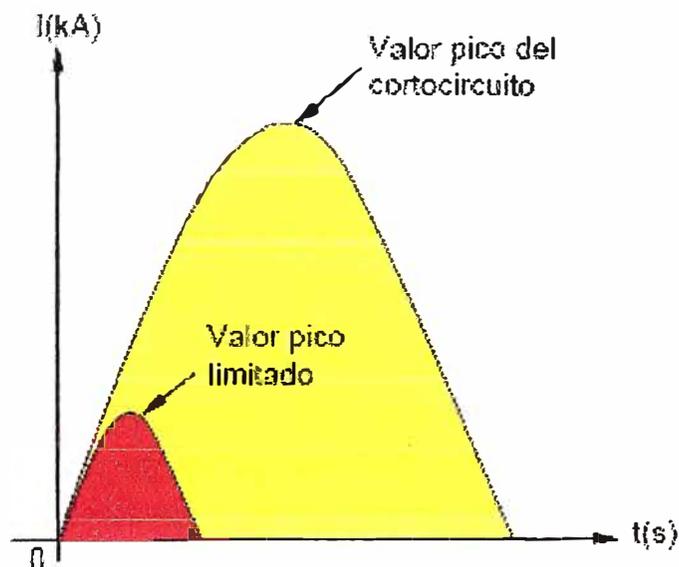


Fig. 2.22: Valor pico limitado de la corriente de cortocircuito.

El interruptor limitador de corriente, no sólo da lugar a una alta capacidad de interrupción sino también limita la corriente y la energía que deja pasar hacia los aparatos aguas abajo. I^2t es una expresión relacionada con la energía que resulta del flujo de la corriente de cortocircuito.

Tabla N° 3.2: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 0,50$; $c.s = 1,00$.

		$I_k \text{ (kA)} \quad F \rightarrow \text{---}$						
Sección (mm ²)	Tipo de Material ¹⁾	Distancia entre fases a (mm)						
		40	50	60	70	80	90	100
10x20	E-Cu-F30	14,8	16,8	18,3	20,0	20,3	21,5	22,8
10x30		—	23,5	26,0	28,2	30,2	32,0	34,0
10x40		—	—	34,0	37,0	40,0	42,5	45,0
10x50		—	—	—	45,5	49,2	50,2	53,2
10x60		—	—	—	—	55,2	59,5	63,2
10x80		—	—	—	—	—	—	81,5

Si por el contrario, el ancho de la barra esté dispuesto en forma perpendicular a la fuerza electromagnética, y calculando el valor de Z con la ecuación (2.21) para $n_s = 1$, se obtiene lo siguiente:

$$I_k = \frac{3,4d \sqrt{abR_{p0.2}(\text{min})}}{nL \sqrt{V_\sigma V_r \beta k_{12}(\text{c.s})}} \quad (3.3)$$

Usando otra vez el programa BUSBAR 865 v1.0, se obtienen las tablas N° 3.3 y N° 3.4:

Tabla N° 3.3: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 0,50$; $c.s = 1,00$ ²⁾.

		$I_k \text{ (kA)} \quad F \rightarrow \text{ }$						
Sección (mm ²)	Tipo de Material ¹⁾	Distancia entre fases a (mm)						
		40	50	60	70	80	90	100
5x20	E-Cu-F37	6,8	7,6	8,3	9,0	9,5	10,0	10,0
5x30		8,5	9,4	10,0	10,0	10,0	10,6	11,0
5x40		10,0	10,0	10,2	10,8	11,6	12,3	12,8
5x50		10,0	10,8	11,6	12,4	13,0	13,8	14,5
5x60		E-Cu-F30	10,0	10,5	11,2	12,0	12,7	13,2
5x80	11,8		12,7	13,5	14,2	15,0	15,7	16,4

Tabla N° 3.4: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 0,50$; $c.s = 1,00$ ³⁾.

		$I_k \text{ (kA)} \quad F \rightarrow \text{ }$					
Sección (mm ²)	Tipo de Material ¹⁾	Distancia entre fases a (mm)					
		50	60	70	80	90	100
10x20	E-Cu-F30	12,0	13,2	14,2	15,2	16,0	17,0
10x30		15,0	16,3	17,6	18,7	19,8	20,0
10x40		17,6	19,0	20,0	20,5	22,0	23,0
10x50		20,0	20,6	22,0	23,5	24,8	26,0
10x60		21,5	23,0	24,5	26,0	27,3	28,5
10x80		26,0	27,6	29,3	30,8	32,3	33,8
10x100		30,2	32,0	33,8	35,2	37,0	38,5
10x120		34,6	36,5	38,2	39,8	41,5	43,0
10x150		41,0	43,0	44,7	46,5	48,2	49,7

La nota 1) se refiere a (Tabla 13-3 [8]). Luego, la nota 2) explica que, para los casos: 5x50, a = 40: c.s = 1,36; 5x60, a = 40: c.s = 1,31; 5x40, a = 50: c.s = 1,24; 5x30, a = 70: c.s = 1,23; 5x30, a = 80: c.s = 1,39 y 5x20, a = 100: c.s = 1,14. Al igual que la nota 3) para el caso 10x30, a = 100: c.s = 1,10.

3.1.2 Sistema de barras de dos o más conductores por fase

Reemplazando las ecuaciones (2.13), (2.14), (2.15), (2.16), (2.17) y (2.18) en la ecuación (2.19), y el resultado, en la desigualdad (2.24), se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\mu_0 \sqrt{3} V_\sigma V_r \beta k_{12}}{32 \pi a Z} (n l_k L)^2 + \frac{\mu_0 \sqrt{3} V_{os} V_{rs}}{64 \pi a_s Z_s} (n l_k L_s)^2 \leq q R_{p0.2}(\text{min}) \quad (3.4)$$

Como se ve en las ecuaciones (2.20) y (2.21), y en la Tabla N° 2.6; Z y Z_s están en función de b y d. Luego, en la Fig. 2.18 a) se observa que L_s es una fracción de L. Finalmente, introduciendo el coeficiente de seguridad c.s, para hacer que la desigualdad (3.4) sea una igualdad y despejando l_k, se obtiene lo siguiente:

$$l_k = \frac{8,32}{nL} \sqrt{\frac{R_{p0.2}(\text{min})}{(c.s) \left[\frac{V_\sigma V_r \beta k_{12}}{aZ} + \frac{V_{os} V_{rs}}{2a_s Z_s (k+1)^2} \right]}} \quad (3.5)$$

Usando el programa BUSBAR 865 v 1.0, para el caso de que el ancho de la barra sea paralelo a la fuerza electromagnética, se obtienen las tablas del N° 3.5 al N° 3.10:

Tabla N° 3.5: Corriente de cortocircuito para: L = 1m; β = 0,50; c.s = 1,00; k = 1.

		I_k (kA) F → = = =			
Sección (mm²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)			
		70	80	90	100
5x50	E-Cu-F37	44,6	47,1	49,3	50,0
5x60		-	54,2	57,1	59,5
5x80		-	-	-	80,0

Tabla N° 3.6: Corriente de cortocircuito para: L = 1m; β = 0,50; c.s = 1,00 ⁴⁾; k = 2.

		I_k (kA) F → = = =			
Sección (mm²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)			
		70	80	90	100
5x50	E-Cu-F37	48,5	50,0	52,3	54,8
5x60		-	59,0	62,7	65,8
5x80		-	-	-	87,0

Tabla N° 3.7: Corriente de cortocircuito para: L = 1m; β = 0,50; c.s = 1,00 ⁵⁾; k = 3.

		I_k (kA) F → = = =			
Sección (mm²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)			
		70	80	90	100
5x50	E-Cu-F37	50,0	51,4	54,5	57,4
5x60		-	60,9	65,1	68,7
5x80		-	-	-	89,8

La indicación 4) se refiere al caso 5x50, a = 80: c.s = 1,08. De la misma manera, la nota 5) el caso 5x50, a = 70: c.s = 1,07.

Tabla N° 3.8: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 0,50$; $c.s = 1,00$; $k = 1$.

		$I_k \text{ (kA)} \quad F \rightarrow = = =$			
Sección (mm ²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)			
		70	80	90	100
10x50	E-Cu-F30	54,8	58,0	60,8	63,2
10x60		-	69,6	73,2	76,4
10x80		-	-	-	102,0

Tabla N° 3.9: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 0,50$; $c.s = 1,00$; $k = 2$.

		$I_k \text{ (kA)} \quad F \rightarrow = = =$			
Sección (mm ²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)			
		70	80	90	100
10x50	E-Cu-F30	58,8	62,8	66,3	69,5
10x60		-	74,7	79,3	83,3
10x80		-	-	-	109,5

Tabla N° 3.10: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 0,50$; $c.s = 1,00$; $k = 3$.

		$I_k \text{ (kA)} \quad F \rightarrow = = =$			
Sección (mm ²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)			
		70	80	90	100
10x50	E-Cu-F30	58,8	62,8	66,3	69,5
10x60		-	74,7	79,3	83,3
10x80		-	-	-	109,5

Si los conductores estén según la Fig. 2.16 b), se tienen las tablas del N° 3.11 al N° 3.16:

Tabla N° 3.11: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 1,00$; $c.s = 1,00$; $k = 1$.

		$I_k \text{ (kA)} \quad F \rightarrow \parallel \parallel \parallel$					
Sección (mm ²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)					
		100	110	120	130	140	150
10x50	E-Cu-F30	22,4	23,2	24,0	24,7	25,4	26,1
10x60		24,9	25,8	26,7	27,5	28,3	29,0
10x80		29,6	30,7	31,7	32,6	33,4	34,4
10x100		34,1	35,2	36,2	37,4	38,4	39,4
10x120		38,2	39,6	40,8	42,0	43,0	44,0

Tabla N° 3.12: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 1,00$; $c.s = 1,00$; $k = 2$.

		$I_k \text{ (kA)} \quad F \rightarrow \parallel \parallel \parallel$					
Sección (mm ²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)					
		100	110	120	130	140	150
10x50	E-Cu-F30	35,4	36,7	37,8	39,0	40,2	41,2
10x60		39,4	40,8	42,2	43,5	44,7	45,8
10x80		47,0	48,7	50,0	50,4	51,7	53,0
10x100		52,8	54,6	56,3	57,8	59,4	60,8
10x120		59,7	61,5	63,2	65,0	66,7	68,3

Tabla N° 3.13: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 1,00$; $c.s = 1,00$; $k = 3$.

		Ik (kA) F → II II II					
Sección (mm²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)					
		100	110	120	130	140	150
10x50	E-Cu-F30	42,3	44,0	45,5	46,9	48,3	49,6
10x60		46,9	48,7	50,0	50,2	51,7	53,1
10x80		53,8	55,8	57,6	59,5	61,2	62,8
10x100		61,9	64,0	66,1	68,0	70,0	71,8
10x120		69,7	72,0	74,2	76,3	78,4	80,3

Tabla N° 3.14: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 1,00$; $c.s = 1,00$; $k = 1$.

		Ik (kA) F → III III III					
Sección (mm²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)					
		100	110	120	130	140	150
10x50	E-Cu-F30	30,0	31,1	32,1	33,1	33,9	34,8
10x60		33,4	34,6	35,7	36,8	37,8	38,7
10x80		39,8	41,2	42,5	43,7	44,8	45,9
10x100		46,0	47,5	48,8	50,0	50,0	51,2
10x120		50,4	52,0	53,4	54,8	56,2	57,4

Tabla N° 3.15: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 1,00$; $c.s = 1,00$; $k = 2$.

		Ik (kA) F → III III III					
Sección (mm²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)					
		100	110	120	130	140	150
10x50	E-Cu-F30	49,8	50,1	51,5	52,8	54,2	55,3
10x60		54,0	55,8	57,5	59,0	60,3	61,7
10x80		64,6	66,7	68,7	70,4	72,0	73,5
10x100		74,8	77,0	79,2	81,2	83,0	84,8
10x120		84,6	87,0	89,4	91,5	93,6	95,6

Tabla N° 3.16: Corriente de cortocircuito para: $L = 1\text{m}$; $\beta = 1,00$; $c.s = 1,00$; $k = 3$.

		Ik (kA) F → III III III					
Sección (mm²)	Tipo de Material	Distancia entre fases a (mm)					
		100	110	120	130	140	150
10x50	E-Cu-F30	58,0	60,1	62,0	63,8	65,5	67,0
10x60		64,6	66,8	69,0	71,0	72,8	74,6
10x80		77,0	79,6	82,0	84,3	86,5	88,6
10x100		88,7	91,6	94,3	97,0	99,5	101,7
10x120		100,2	103,4	106,2	109,0	111,6	114,3

A modo de resumen se puede concluir que, los valores de corrientes de cortocircuito mostrados en las tablas de los apartados 3.1.1 y 3.1.2, son las máximas corrientes que pueden soportar los conductores montados en un tramo sin tomar en cuenta fuerzas en los aisladores porta barras.

3.2 Resistencia térmica de un conductor de sección rectangular

Relacionando las ecuaciones dadas en el apartado 2.3.2, la corriente de cortocircuito eficaz I_k , que puede soportar un conductor de sección rectangular sin que supere la temperatura máxima permitida por el material del conductor (ver Tabla 2.8), depende básicamente del tiempo de duración del cortocircuito y de la sección del conductor. Para el caso de sistemas de barras de dos o más conductores por fase, y cuya sección total sea mayor a 600 mm^2 , se debe considerar un factor de distribución de corriente debido al efecto pelicular.

$$I_k = \frac{AK}{c.s.p.\sqrt{T_k}} \quad (3.6)$$

Donde:

- A : Sección del conductor (mm^2).
- K : Constante del material ($\text{As}^{1/2}/\text{mm}^2$).
- T_k : Duración de cortocircuito (s).
- c.s : Coeficiente de seguridad.
- p : Factor de distribución de corriente (ver Tabla N° 2.9).

Los valores de K para E-Cu-F37 y E-Cu-F30, cuando $\theta_b = 65 \text{ °C}$ (temperatura de operación de la barra) y $\theta_a = 200 \text{ °C}$ (ver Tabla N° 2.8), son 74 y 75 respectivamente. Luego, variando la sección del conductor y el tiempo de duración del cortocircuito, para el caso de un conductor por fase, se obtienen las tablas N° 3.17 y N° 3.18:

Tabla N° 3.17: Corriente de cortocircuito para: c.s = 1,00; p = 1,00.

Sección (mm^2)	I_k (kA) F →				
	T_k (s)				
	0,01	0,05	0,10	0,50	1,00
5x20	74,1	33,1	23,4	10,5	7,4
5x30	111,2	49,7	35,1	15,7	11,1
5x40	148,2	66,3	46,9	21,0	14,8
5x50	185,3	82,8	58,6	26,2	18,5

Tabla N° 3.18: Corriente de cortocircuito para: c.s = 1,00; p = 1,00.

Sección (mm^2)	I_k (kA) F →				
	T_k (s)				
	0,01	0,05	0,10	0,50	1,00
10x30	225,0	100,6	71,2	31,8	22,5
10x40	300,0	134,2	94,9	42,4	30,0
10x50	375,0	167,7	118,6	53,0	37,5
10x60	450,0	201,2	142,3	63,6	45,0
10x80	600,0	268,3	189,7	84,9	60,0

Para el caso de varios conductores por fase, se obtienen las tablas del N° 3.19 al N° 3.21:

Tabla N° 3.19: Corriente de cortocircuito para: $c.s = 1,00$; $p = 0,50$.

Sección (mm ²)	I_k (kA) F → II II II				
	T_k (s)				
	0,01	0,05	0,10	0,50	1,00
10x40	600,0	268,3	189,7	84,9	60,0
10x50	750,0	335,4	237,2	106,1	75,0
10x60	900,0	402,5	284,6	127,3	90,0
10x80	1200,0	536,7	379,5	169,7	120,0

Tabla N° 3.20: Corriente de cortocircuito para: $c.s = 1,00$; $p = 0,37$.

Sección (mm ²)	I_k (kA) F → III III III				
	T_k (s)				
	0,01	0,05	0,10	0,50	1,00
10x40	810,0	362,2	256,1	114,6	81,0
10x50	1012,5	452,8	320,2	143,2	101,3
10x60	1215,0	543,4	384,2	171,8	121,5
10x80	1620,0	724,5	512,3	229,1	162,0

Tabla N° 3.21: Corriente de cortocircuito para: $c.s = 1,00$; $p = 0,32$.

Sección (mm ²)	I_k (kA) F → II II II II				
	T_k (s)				
	0,01	0,05	0,10	0,50	1,00
10x40	930,0	415,9	294,1	131,5	93,0
10x50	1162,5	519,9	367,6	164,4	116,3
10x60	1395,0	623,9	441,1	197,3	139,5
10x80	1860,0	831,8	588,2	263,0	186,0

Donde p indica la carga de corriente en los sub-conductores extremos de cada fase.

3.3 Resistencia mecánica de los aisladores porta barras

La fuerza F_d que soporta un aislador porta barras no debe ser mayor que el valor dado por el fabricante. El esfuerzo en el aislador debido a una fuerza de flexión igual al valor nominal que puede soportar, actúa en la cabeza del aislador. Para puntos más altos de la cabeza del aislador, un valor menor debe ser usado.

3.4 Criterios para aumentar la capacidad de cortocircuito de un sistema de barras

Toda empresa que se dedica a diseñar, fabricar y vender tableros eléctricos, busca mejorar sus tiempos de producción y de entrega. Para ello, la empresa prefabrica aquellos tableros (con sus respectivos Sistemas de Barras principales) que tienen mayor salida, con características mecánicas y eléctricas definidas, convirtiéndose en un producto estándar. Sin embargo, en algunos casos, el cliente solicita que el Sistema de Barras Principal del tablero eléctrico que va a adquirir, tenga una resistencia a los cortocircuitos mayor al definido en el estándar por el diseñador.

Ante ello se tiene que tomar en cuenta los siguientes criterios para aumentar la capacidad de cortocircuito del Sistema de Barras Principal.

3.4.1 Reubicación de los aisladores porta barras

Como se puede apreciar en las ecuaciones (3.2) (3.3) y (.3.5), al reducir la distancia entre los aisladores porta barras (L), la corriente de cortocircuito I_K que puede soportar el Sistema de Barras Principal es mayor. En la Fig. 3.1, se ve el comportamiento de I_K vs L .

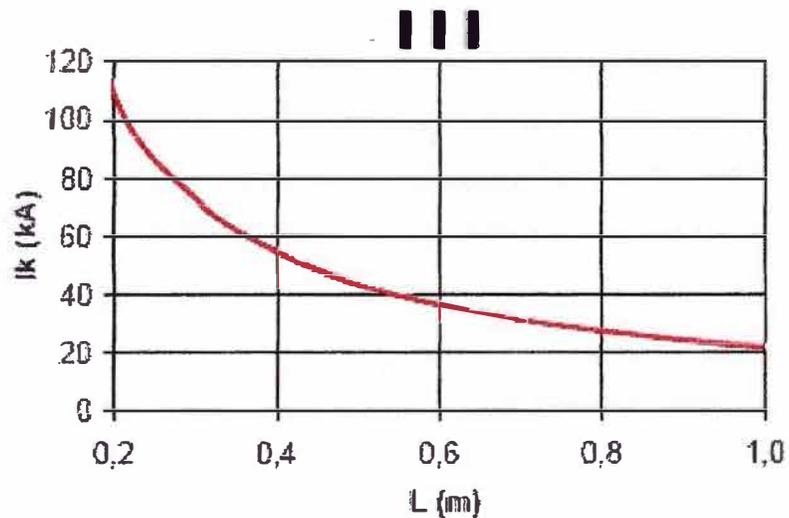
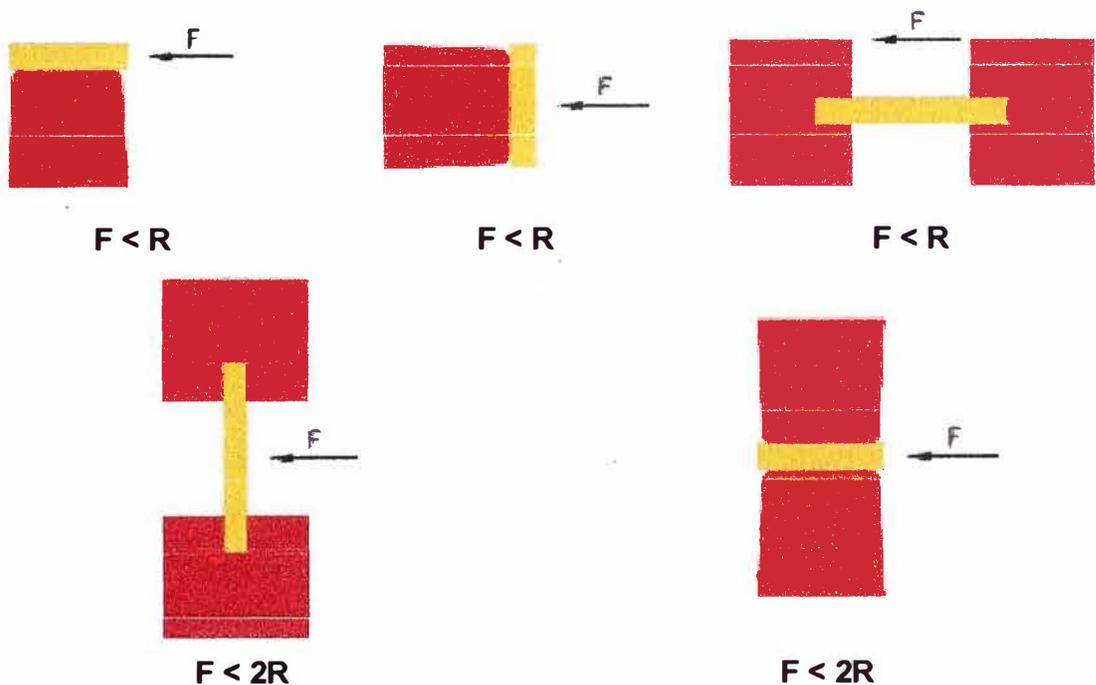


Fig. 3.1: E-Cu-F30 10x50, $a = 70$ mm.

3.4.2 Modo de empleo de los aisladores porta barras

En la Fig. 3.2, se muestran los modos de empleo más utilizados de los aisladores porta barras con sus respectivas resistencias mecánicas.



R: Resistencia a la ruptura (valor dado por el fabricante).

Fig. 3.2: Modo de empleo de los aisladores porta barras

3.4.3 Variación de la distancia entre fases

El aumento de la distancia entre fases (a) permite al Sistema de Barras Principal soportar una corriente de cortocircuito I_k mayor, tal como se observa en la Fig. 3.3.

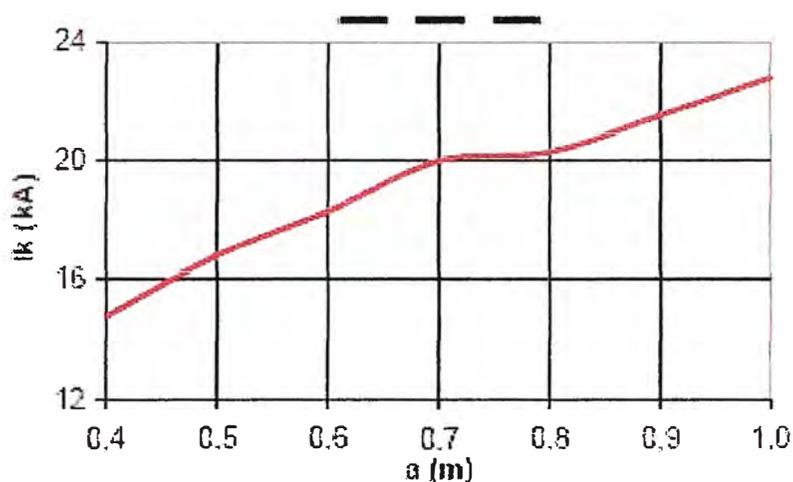


Fig. 3.3: E-Cu-F30 10x20, L = 1 m.

3.5 Criterios para el diseño de un Sistema de Barras Principal

Dada una red eléctrica de baja tensión, con la ayuda de un programa especializado se determina las corrientes de cortocircuito en cada punto de la red. Luego, un tablero eléctrico al ser instalado en algún punto de la red, a través de un interruptor u otro elemento de conmutación. El Sistema de Barras Principal del tablero eléctrico debe ser diseñado para resistir los efectos de la corriente de cortocircuito en dicho punto. Por lo tanto, se requiere desarrollar varias alternativas de solución, posteriormente evaluarlos y escoger aquella que garantice un buen margen de seguridad, y además tenga un costo de fabricación y montaje económico.

3.5.1 Selección del material del conductor

Los materiales más utilizados en la fabricación de conductores eléctricos son el cobre y el aluminio. Aunque ambos metales tienen una conductividad eléctrica excelente, el cobre es el elemento principal en la fabricación de conductores por sus notables ventajas mecánicas y eléctricas, tal como se observa en la Tabla N° 2.1.

El empleo de uno u otro material como conductor, depende de sus características eléctricas (capacidad para transportar la electricidad), mecánicas (módulo de elasticidad y límite de fluencia), del uso específico que se le quiera dar y del costo.

3.5.2 Sección del conductor

Un primer criterio para determinar la sección del conductor es la corriente nominal del interruptor asociado al Sistema de Barras Principal. Luego, se verifica si dicha sección puede soportar los esfuerzos mecánicos producido por la corriente de cortocircuito I_k , en caso contrario se busca otra sección.

Es importante tomar en cuenta que a mayor tamaño del conductor, mayor será el costo de fabricación del Sistema de Barras Principal. En la Tabla N° 3.22, se dan precios por metro lineal del conductor según su sección.

Tabla N° 3.22: Precio del conductor según la sección

Sección (mm ²)	Peso lineal (kg/m)	Precio x m ⁶⁾ (\$)	Tipo de Material
3x15	0,396	3,204	E-Cu-F37
3x20	0,529	4,272	
3x25	0,663	5,340	
5x20	0,882	7,120	
5x25	1,110	8,900	
5x30	1,300	10,680	
5x40	1,770	14,240	
5x50	2,220	17,800	
5x60	2,660	21,360	
5x80	3,550	28,480	
10x30	2,660	21,360	
10x40	3,550	28,480	
10x50	4,440	35,600	
10x60	5,330	42,720	
10x80	7,110	56,960	
10x100	8,890	71,200	
10x120	10,700	85,440	
10x150	13,300	106,800	
10x160	14,200	113,920	
10x200	17,800	142,400	

La nota 6) indica que los precios corresponde a la fecha, 4/11/2009.

3.5.3 Disposición de perfiles

Cuando se rota la barra 90°, de una disposición vertical a una disposición horizontal (ver Fig. 3.4), la resistencia a los esfuerzos mecánicos producidos por el paso de la corriente de cortocircuito aumenta, tal como se observan en las tablas de los apartados 3.1.1 y 3.1.2.

Este punto es muy útil para decidir entre una barra de gran sección en disposición vertical y otra de menor sección en disposición horizontal, que van a resistir los mismos esfuerzos mecánicos.

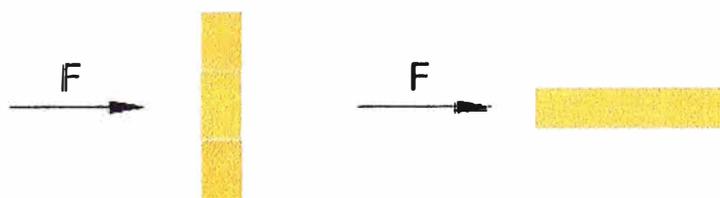


Fig. 3.4: Disposición del perfil de la barra.

3.5.4 Selección del tipo de aislador porta barras

La selección del tipo de aislador porta barras depende mucho del modo de empleo (ver Fig. 3.2) que a su vez está relacionado con la disposición de perfiles. También se toma en consideración las características técnicas: nivel de tensión de trabajo en kV y la carga mínima de ruptura en kgf. En la Tabla N° 3.23 se muestran los precios de los aisladores porta barras.

Tabla N° 3.23: Precio de los aisladores porta barras

Descripción del aislador	Nivel de tensión (kV)	Carga de Ruptura (kg)	Precio ⁷⁾ (\$)
AI 0,5/0400	0,5	400	0,60
AI 1,0/0750	1,0	750	1,05
AI 1,0/1000	1,0	1000	1,67
AI 1,5/1250	1,5	1250	3,30
AI 1,5/1300	1,5	1300	3,50
E2 1,0/1300	1,0	1300	2,80
E3 1,0/1300	1,0	1300	2,85

La nota 7) indica que los precios corresponde a la fecha 4/11/2009.

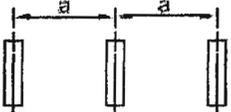
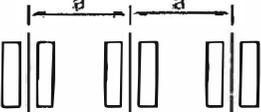
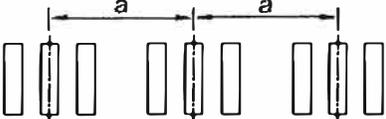
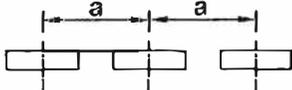
3.5.5 Distancia entre aisladores porta barras

A modo de regla práctica se recomienda una distancia inicial entre aisladores porta barras igual al 90% de la longitud del espacio destinado para el montaje del Sistema de Barras Principal; a fin de realizar los cálculos de esfuerzos mecánicos. Luego, si es necesario, se reduce dicho valor hasta llegar a la corriente de cortocircuito solicitada.

3.5.6 Distancia entre fases

Como regla práctica se recomienda utilizar como valor inicial de la distancia entre fases, para los cálculos de los esfuerzos mecánicos, los dados en la Tabla 3.24.

Tabla N° 3.24: Valores iniciales de a.

	$a \geq 6d$, d : espesor de barra
	$a \geq 8d$, d : espesor de barra
	$a \geq 10d$, d : espesor de barra
	$a \geq b + 20$, b : ancho de barra

Una consideración que se debe tomar en cuenta para la distancia entre fases, es que debe permitir la fácil colocación de los pernos de amarre de las barras derivadas; es decir que la distancia entre fases debe ser mayor que la longitud del perno, ver Fig. 3.5.



Fig. 3.5: Montaje de barras derivadas.

También se debe ver que el extremo o la cabeza del perno, que amarra la barra derivada con el Sistema de Barras Principal, no disminuya la distancia de seguridad entre fases o fase a tierra (14 mm hasta 600V), ver Fig. 3.6.

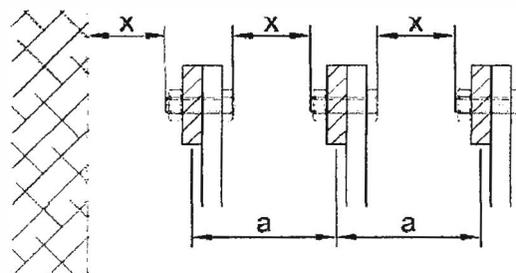


Fig. 3.6: Distancia de seguridad fase-fase, fase-tierra ($x \geq 14$ mm).

3.5.7 Cantidad de espaciadores

El espaciador es un elemento que mantiene la separación entre los sub-conductores y ayuda a reducir los esfuerzos mecánicos en los mismos. Cuando los perfiles de los sub-conductores están dispuestos en forma horizontal, la colocación de espaciadores no disminuyen las fuerzas en los aisladores porta barras, pero si los perfiles de los sub-conductores están dispuestos en forma vertical, las fuerzas en los aisladores porta barras disminuyen.

3.5.8 Duración de la corriente de cortocircuito

La duración de la corriente de cortocircuito T_k está relacionada con los esfuerzos térmicos y depende del tiempo de apertura del interruptor automático, que varía según el tipo de interruptor. Los interruptores limitadores de corriente tienen tiempos de apertura muy cortos (menores a un ciclo), tal como se observa en la Fig. 3.7.

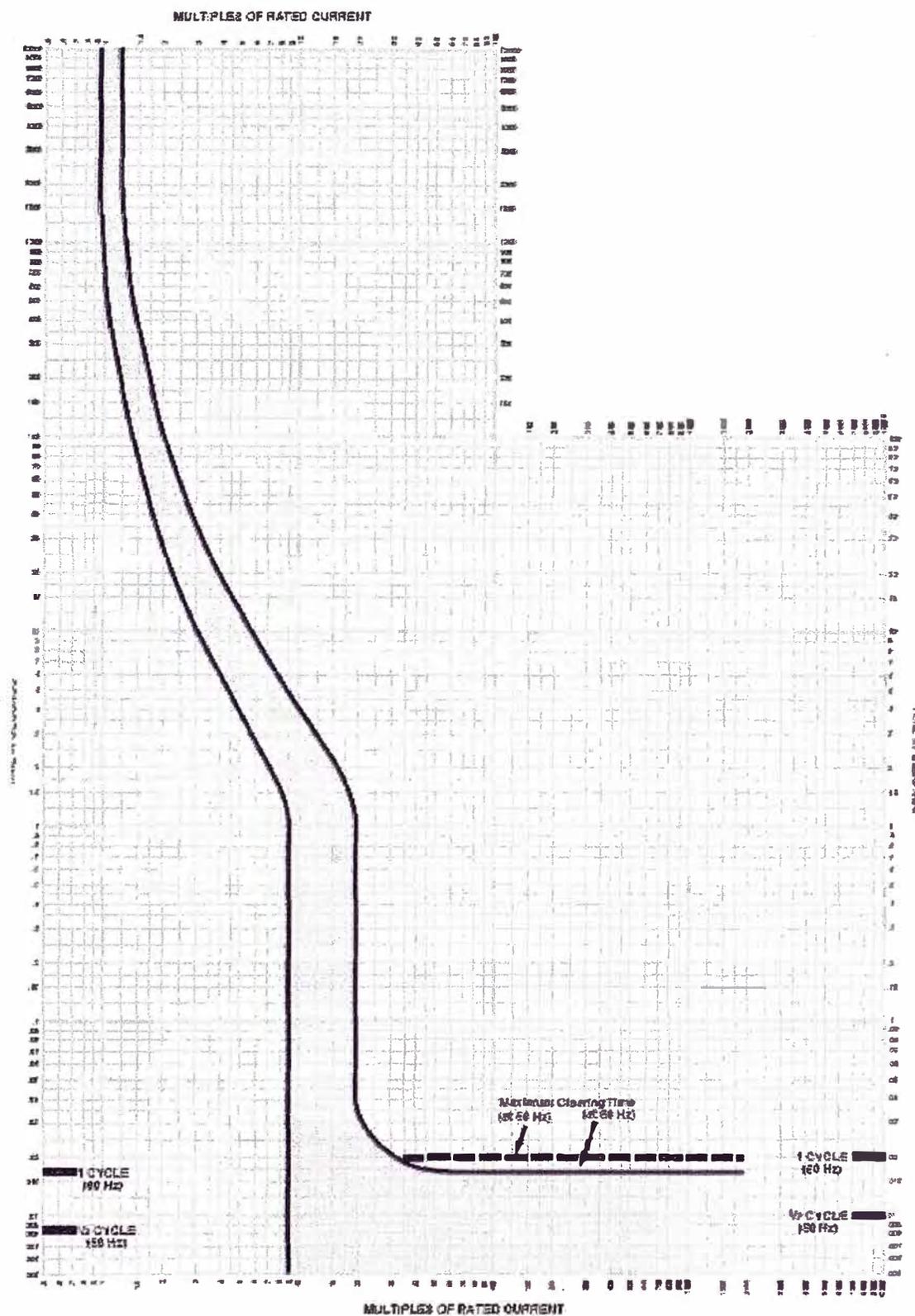


Fig. 3.7: Curva de tiempo - corriente de un interruptor automático.

El interruptor limitador de corriente, no sólo da lugar a una alta capacidad de interrupción sino también limita la corriente de cortocircuito (valor pico) y la energía que deja pasar hacia el Sistema de Barras Principal; este hecho ayuda a reducir los esfuerzos mecánicos y térmicos en los conductores.

CAPÍTULO IV HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE BARRAS PRINCIPAL

4.1 Introducción

Como se ha podido notar en el capítulo 2, el cálculo de los efectos de la corriente de cortocircuito es complejo, por eso, es necesario usar una herramienta computacional que permita hacer estos cálculos en forma rápida. Pero el cálculo solo no es suficiente, los resultados deben ser validados en una simulación, donde otro programa es requerido. Para el presente informe se usará los programas: BUSBAR 865 v1.0 y SAP2000 v14.

4.2 BUSBAR 865 v1.0

El BUSBAR 865 v1.0, es un programa elaborado en EXCEL 2003, que calcula los efectos de la corriente de cortocircuito según la norma IEC 60865 – 1; y tiene como fin ayudar en el diseño de un Sistema de Barras Principal. Está dividido en ocho pestañas: Carátula, Dat n = 1, Dat n > 1, Res n = 1, Res n > 1, Rep n = 1, Rep n > 1 y Tablas.

4.2.1 Carátula

En esta parte se hace la presentación del programa, en la cual se muestra una imagen característica acompañada del nombre del programa y de los datos del autor; tal como se puede apreciar en la Fig. 4.1.



Fig. 4.1: Carátula del programa BUSBAR 865 v1.0.

4.2.2 Dat n = 1

En esta plantilla (ver Fig. 4.2) se ingresa los datos para el caso de un sistema de barras de un sólo conductor por fase.

4.2.3 Dat n > 1

En esta plantilla (ver Fig. 4.3) se ingresa los datos para el caso de un sistema de barras de dos o más conductores por fase.

Fig. 4.2: Plantilla de Dat n = 1.

Fig. 4.3: Plantilla de Dat n > 1.

4.2.4 Res n = 1

En esta parte se muestra en forma resumida los resultados de los cálculos hechos por el algoritmo del programa con los datos ingresados en Dat n = 1; ver Fig. 4.4.

4.2.5 Res n > 1

En esta parte se muestra en forma resumida los resultados de los cálculos hechos por el algoritmo del programa con los datos ingresados en Dat n > 1; ver Fig. 4.5.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Datos									
2										
3	Sección del conductor:			mm ²		10x160		R _{res} (N/mm ²)		
4	Material del conductor:					E-Cu-F30		Min	Max	
5	Acabado del conductor:					Pintado		250	300	
6	Disposición de barras:					III				
7	Capacidad del conductor:			A		2700				
8	Corriente de cortocircuito trifásica:			KA		16,0				
9	Corriente de cortocircuito pico:			KA		30,5				
10	Número de tramos:					1				
11	Distancia entre soportes:			mm		1000				
12	Distancia entre conductores:			mm		200				
13	Tipo de soporte:	A				AP 1.0KV /1000Kg				
14		B				AP 1.0KV /1000Kg				
15										
16										
17	Efectos mecánicos					Simplificado		Valor límite		
18										
19	El esfuerzo de flexión calculado σ _{fl} es:			N/mm ²		17,3				375
20										
21	Fuerza en el soporte externo (A):			kg		101,8				1000
22										
23	Fuerza en el soporte interno (B):			kg		101,8				1000
24										
25	Efectos térmicos									
26										
27	Densidad de corriente de cortocircuito:			A/mm ²		10,0				75,2
28										
29	El Sistema de Barras Principal soporta los efectos de la corriente de cortocircuito de 16kA									
30										

Fig. 4.4: Resumen para n = 1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Datos									
2										
3	Sección del conductor:			mm ²		10x50		R _{res} (N/mm ²)		
4	Material del conductor:					E-Cu-F30		Min	Max	
5	Acabado del conductor:					Desnudo		250	300	
6	Disposición de barras:					III III III				
7	Capacidad del conductor:			A		2300				
8	Corriente de cortocircuito trifásica:			KA		16,0				
9	Corriente de cortocircuito pico:			KA		30,5				
10	Número de tramos:					≥ 3				
11	Número de espaciadores:					1				
12	Distancia entre soportes:			mm		1000				
13	Distancia entre conductores:			mm		200				
14	Tipo de soporte:	A				E3 1.0KV /1300Kg				
15		B				E3 1.0KV /1300Kg				
16										
17										
18	Efectos mecánicos					Simplificado		Valor límite		
19										
20	El esfuerzo de flexión calculado σ _{fl} es:			N/mm ²		40,3				375
21										
22	Fuerza en el soporte extremo (A):			kg		88,8				1300
23										
24	Fuerza en el soporte interno (B):			kg		243,7				1300
25										
26	Efectos térmicos									
27										
28	Densidad de corriente de cortocircuito:			A/mm ²		10				117,3
29										
30	El Sistema de Barras Principal soporta los efectos de la corriente de cortocircuito de 16kA									
31										

Fig. 4.5: Resumen para n > 1.

4.2.6 Rep n = 1

En esta parte se muestran los resultados en forma detallada, de los cálculos hechos por el algoritmo del programa con los datos ingresados en Dat n = 1. El reporte mostrado en la Fig. 4.6 es una información más detallada del mostrado en Res n = 1.

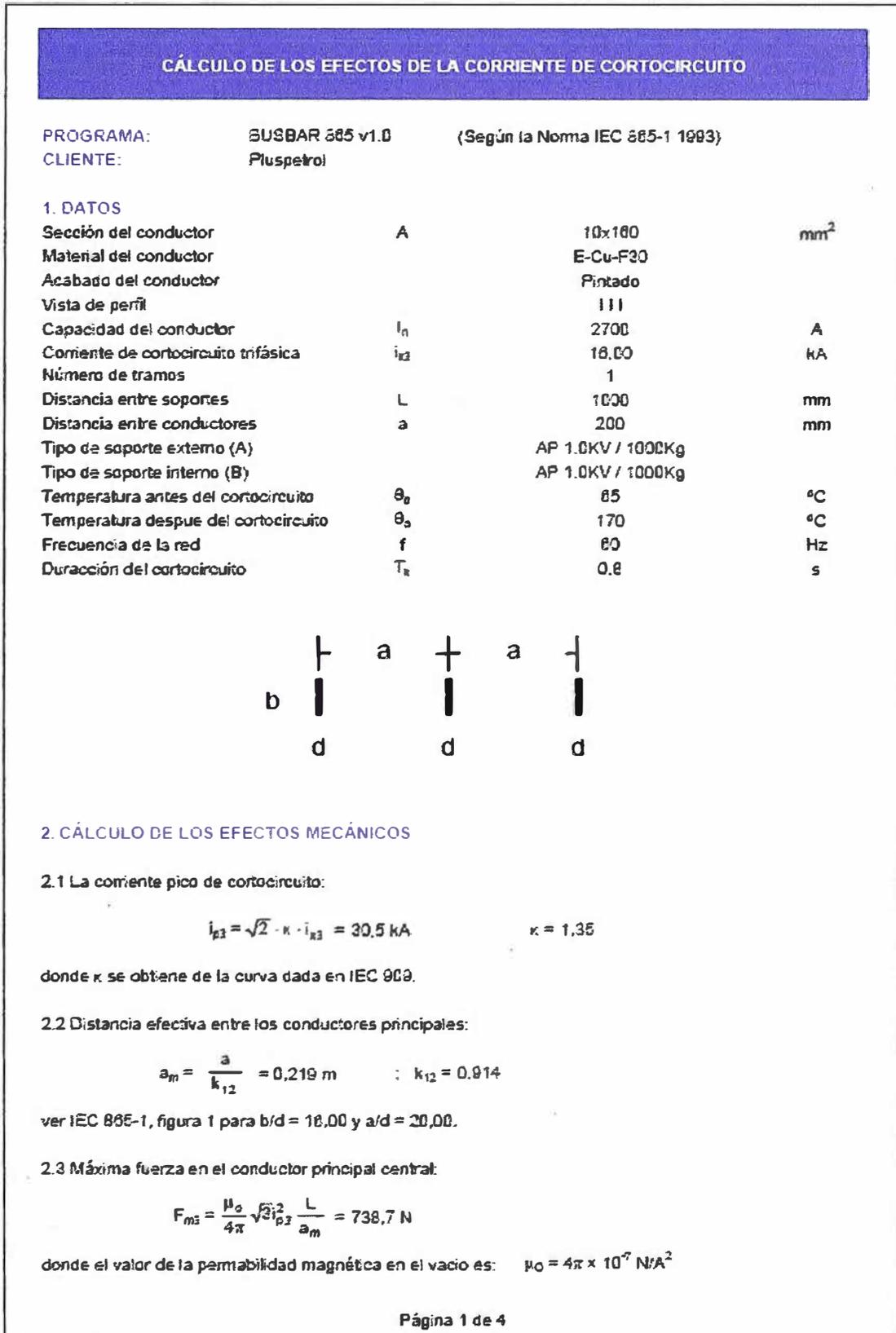


Fig. 4.6: Reporte para n = 1.

4.2.7 Rep n > 1

En esta parte se muestra los resultados, en forma detallada, de los cálculos hechos por el algoritmo con los datos ingresados en Dat n > 1. El reporte mostrado en la Fig. 4.7 es una información más detallada del mostrado en Res n > 1.

CÁLCULO DE LOS EFECTOS DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

PROGRAMA: BUSBAR 88E v1.0 (Según la Norma IEC 865-1 1993)
CLIENTE: Buenaventura

1. DATOS

Sección del conductor	A	10x80	mm ²
Material del conductor		E-Cu-F30	
Acabado del conductor		Desnudo	
Número de sub-conductores por fase		3	
Vista de perfil		III	
Capacidad del conductor	I ₁	2300	A
Corriente de cortocircuito trifásica	I _{sc3}	18,00	kA
Número de tramos		≥ 3	
Número de espaciadores		1	
Distancia entre soportes	L	1000	mm
Distancia entre conductores	a	200	mm
Distancia entre espaciadores	L _s	500	mm
Tipo de soporte externo (A)		E3 1.0KV / 1300Kg	
Tipo de soporte interno (B)		E2 1.0KV / 1300Kg	
Temperatura antes del cortocircuito	θ ₀	88	°C
Temperatura después del cortocircuito	θ _s	170	°C
Frecuencia de la red	f	60	Hz
Duración del cortocircuito	T _s	0,6	s

2. CÁLCULO DE LOS EFECTOS MECÁNICOS

2.1 La corriente pico de cortocircuito:

$$i_{p3} = \sqrt{2} \cdot k \cdot i_{sc3} = 30,5 \text{ kA} \quad k = 1,35$$

donde k se obtiene de la curva dada en IEC 839.

2.2 Distancia efectiva entre conductores principales:

$$a_m = \frac{a}{k_{11}} = 0,201 \text{ m} \quad k_{11} = 0,695$$

ver IEC 865-1, figura 1 para b/dm = 1,20 y a/dm = 4,00.

2.3 Distancia efectiva entre sub-conductores principales:

$$a_s = 1 + \sum_{s=1}^{n_s} \frac{k_{1s}}{a_{1s}} = 0,0205 \text{ m}$$

Página 1 de 4

Fig. 4.7: Reporte para n > 1.

4.2.8 Tablas

En esta parte se proporcionan los datos del tipo de material del conductor de acuerdo a la sección (Tabla 1) y los valores que toma α , β y γ (Tabla 2).

4.3 Sap2000 versión 14

El SAP2000 versión 14, es un programa aplicado a la ingeniería estructural, está basado en el cálculo por elemento finito, conforme a las normas más conocidas: AISC (EEUU), RCDF (México) y Eurocódigo (Europa). Mayormente es utilizado para el diseño de estructuras de acero o de concreto, pero el programa también permite usar otros tipos de materiales; para nuestro caso el material es el cobre o el aluminio. En la Fig. 4.8 se puede apreciar la presentación al ingresar al programa.

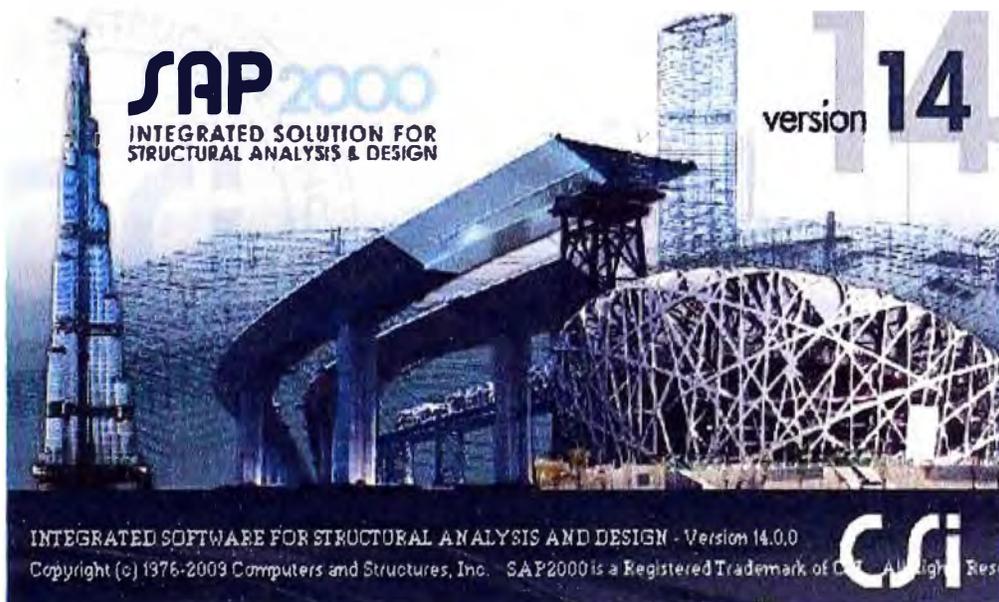


Fig. 4.8: Presentación de programa SAP2000 v.14.

Para poder simular el comportamiento de un conductor de sección rectangular ante la aplicación de una fuerza electromecánica debido a un cortocircuito, se debe seguir los siguientes pasos:

- Ingreso al programa
- Selección de las unidades
- Selección del modelo estructural
- Asignación del tipo de apoyo
- Definición del tipo de material
- Definición la sección
- Definición y asignación de las cargas
- Selección de la norma de diseño
- Análisis
- Resultados

4.3.1 Ingreso al programa (paso 1)

Para ingresar al programa se puede hacer de dos maneras: hacer doble clic en el icono que se encuentra en el escritorio, o acceder a través del menú de inicio hasta ubicar el programa; tal como se muestra en la Fig. 4.9.



Fig. 4.9: Inicio del SAP2000 versión 14.

Luego de iniciar el programa, aparece la ventana de trabajo; ver Fig. 4.10.

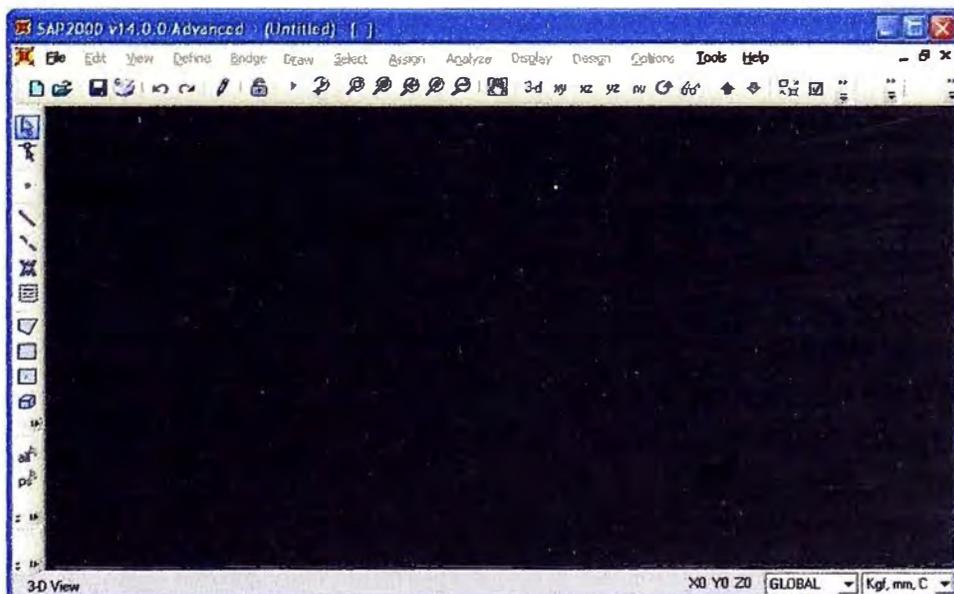


Fig. 4.10: Ventana de trabajo del SAP2000 versión 14.

4.3.2 Selección de las unidades (paso 2)

En la parte inferior derecho de la ventana de trabajo del SAP200, se hace clic en la lista desplegable y se selecciona las unidades con que se va a trabajar; se recomienda para nuestro caso las unidades: Kg, mm, C.

4.3.3 Selección de la geometría del modelo (paso 3)

Para poder acceder a las diferentes plantillas o modelos genéricos de análisis que tiene incorporado el SAP2000 se debe ir a **File/New Model**; ver Fig. 4.11.



Fig. 4.11: Selección de la geometría del modelo.

Luego, se selecciona la plantilla **Beam** y aparece el cuadro mostrado en la Fig. 4.12, donde se ingresa el número de tramos y la longitud del tramo.



Fig. 4.12: Definición de la geometría del modelo.

Después de ingresado los valores en el cuadro anterior, aparece en la pantalla las vistas del modelo estructural seleccionado; ver Fig. 4.13.

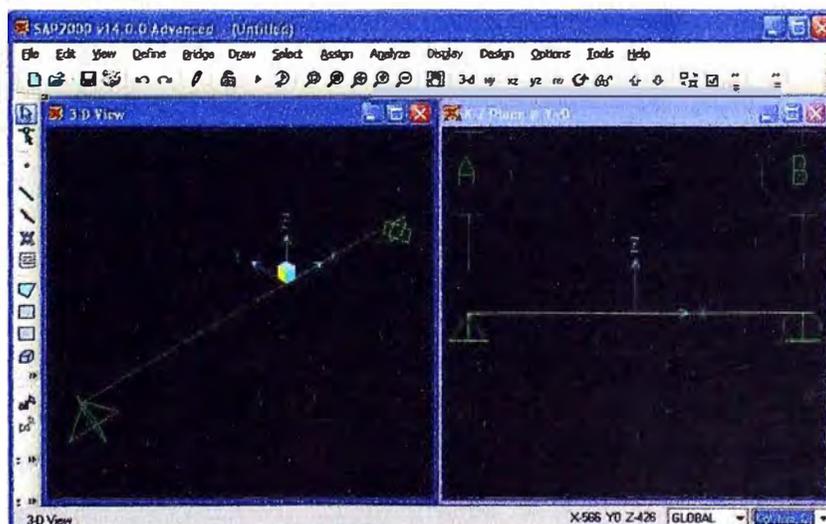


Fig. 4.13: Vistas de la geometría del modelo.

4.3.4 Asignación del tipo de apoyo (paso 4)

Para poder asignar el tipo de apoyo, se debe seleccionar un nudo correspondiente al nivel $Z = 0$, luego se hace clic en el menú **Assign/Joint/Restraints**. Seguidamente se muestra el cuadro de restricciones, donde se debe seleccionar las restricciones que tendrá el nudo elegido; ver la Fig. 4.14.

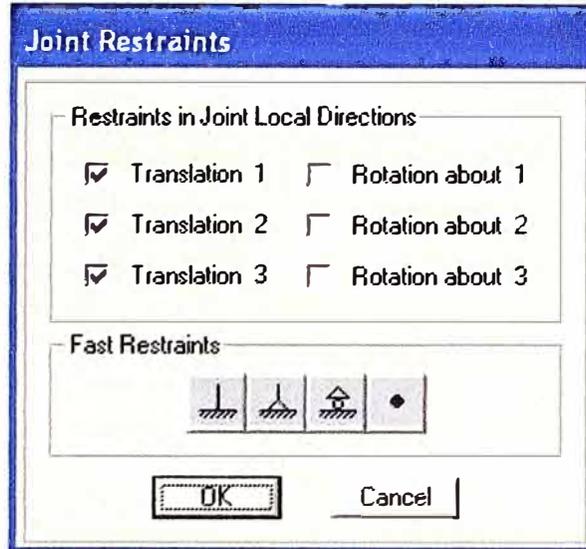


Fig. 4.14: Asignación del tipo de apoyo.

4.3.5 Definición del tipo de material (paso 5)

Luego de haber definido la geometría del modelo, se debe definir el tipo de material a utilizar, para ello se hace clic en el menú **Define/Materials**, después se muestra la ventana con los diferentes tipos de materiales; ver Fig. 4.15.

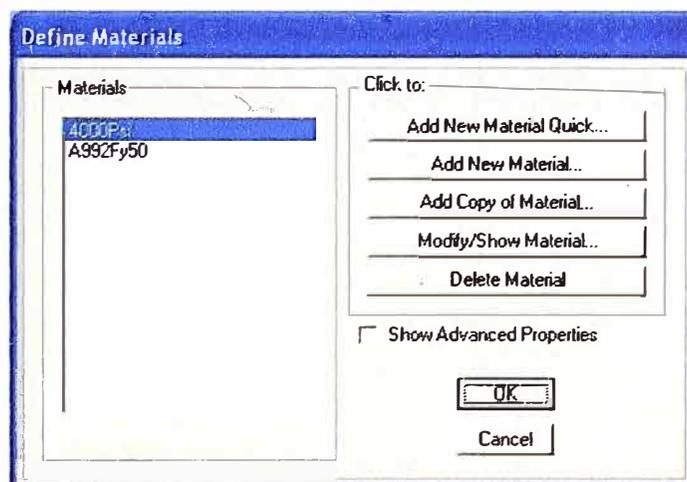
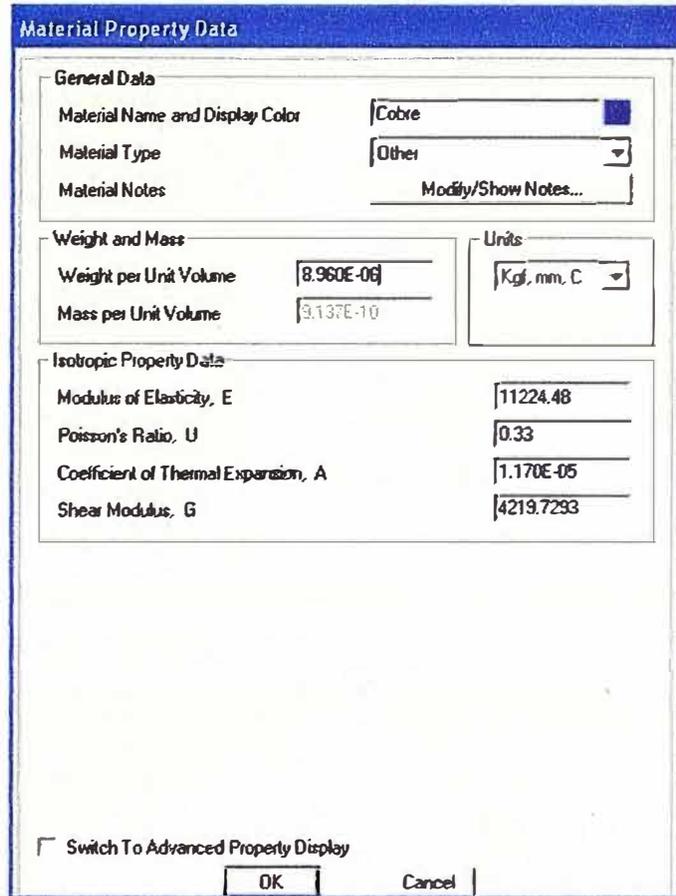


Fig. 4.15: Definición del tipo de Material.

Para este caso se hace clic en la opción **Add New Material**, donde aparece una ventana, en el cual se debe nombrar el material: Cobre o Aluminio (Existe en el SAP2000 el material aluminio, pero este se refiere al aluminio estructural, que es diferente al usado para la fabricación de conductores), seguidamente de las propiedades del nuevo material; ver Fig. 4.16.



Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Cobre

Material Type: Other

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 8.960E-06

Mass per Unit Volume: 9.137E-10

Units: Kgf, mm, C

Isotropic Property Data:

Modulus of Elasticity, E: 11224.48

Poisson's Ratio, U: 0.33

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 4219.7293

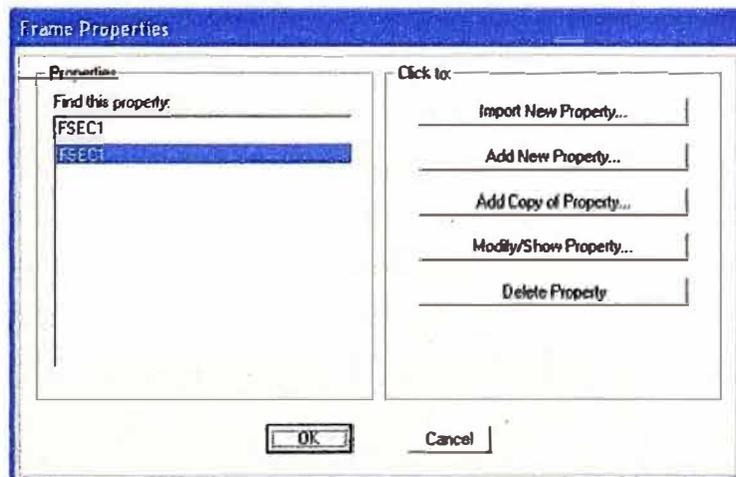
Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Fig. 4.16: Definición del nuevo Material.

4.3.6 Definición de la sección (paso 6)

Para definir la sección se ingresa al menú **Define/Section Properties/Frame Sections**, luego se hace clic en **Add New Property**, ver Fig. 4.17.



Frame Properties

Properties

Find this property:

FSEC1

FSEC1

Click to:

Import New Property...

Add New Property...

Add Copy of Property...

Modify/Show Property...

Delete Property

OK Cancel

Fig. 4.17: Definición de la sección.

Seguidamente se muestra una ventana (ver Fig. 4.18) en donde se debe nombrar a la nueva sección y escoger un perfil, en este caso se debe de elegir de los perfiles del acero (**Steel**), aquel que se aproxime a la sección rectangular. Se recomienda la opción **Angle**, luego, se modifica el perfil y se le asigna el nuevo material previamente definido.

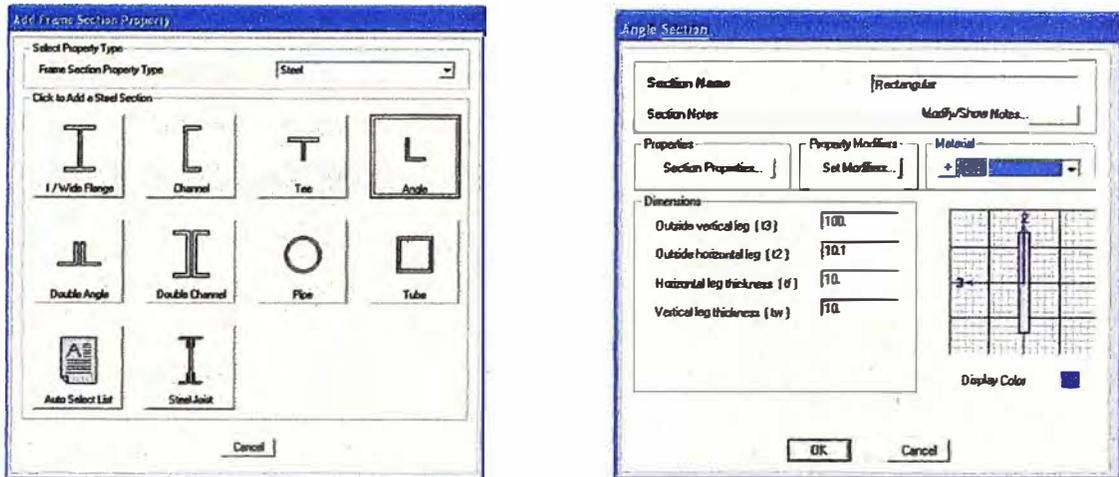


Fig. 4.18: Modificación de la sección.

Para asignar al modelo la sección definida, se debe seleccionar los tramos, luego se va al menú **Assign/Frame/Frame Sections** y se escoge la sección previamente definida; como se muestra en la Fig. 4.19.

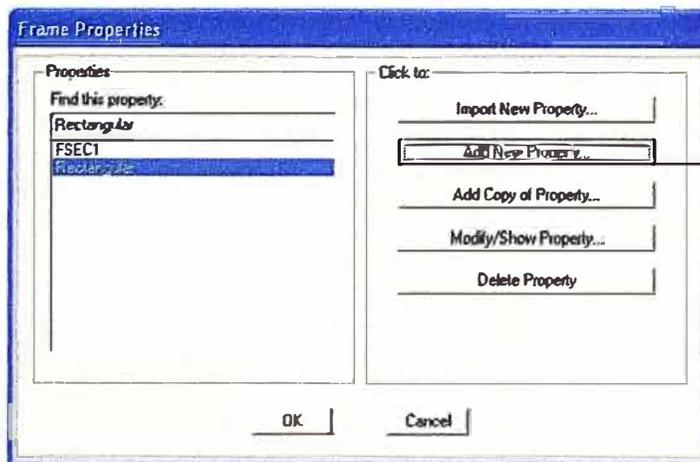


Fig. 4.19: Asignación de la sección.

4.3.7 Definición y asignación de las cargas (paso 7)

Por defecto el programa define la carga el peso propio de todos los elementos que conforman el modelo. Para definir una nueva carga se va al menú **Define/Load Patterns**, luego se muestra la ventana de definición de cargas en la cual se nombra y se le asigna el tipo de carga **LIVE**; como se muestra en la Fig.4.20.

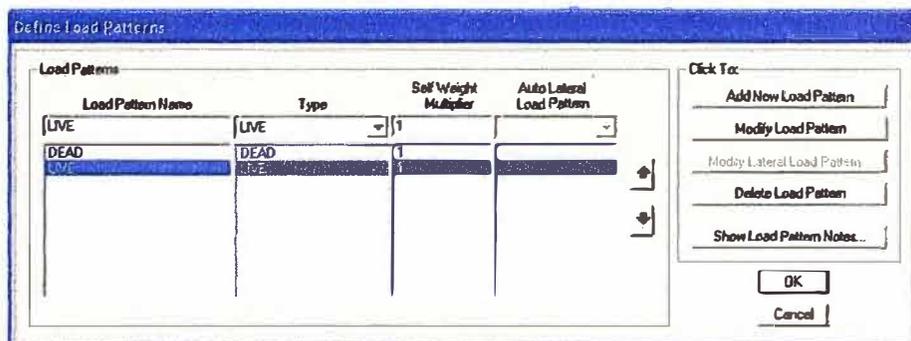


Fig. 4.20: Definición de una nueva carga.

Para asignar la carga viva al modelo, se debe ir al menú **Assign/Frame Loads**, luego se recomienda el caso **Distributed** (carga distribuida). En la ventana mostrada en la Fig. 4.21, se debe ingresar la magnitud (kgf/mm) y la dirección de la carga.

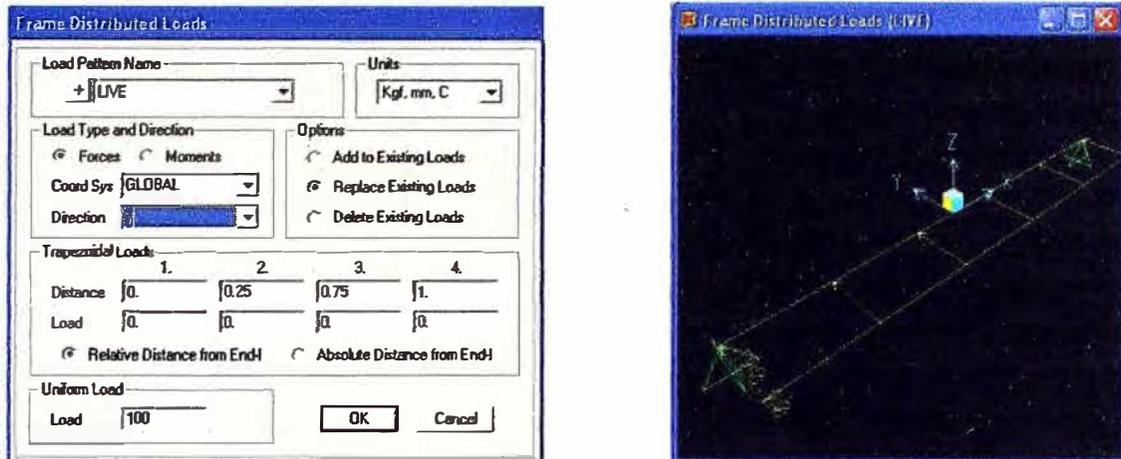


Fig. 4.21: Asignación de la nueva carga.

4.3.8 Selección de la norma de diseño (paso 8)

En este caso se ingresa al menú **Design/Steel Frame Design/View/Revice Preferentes**, luego se selecciona la norma (se recomienda AISC LRFD 1993); ver Fig. 4.22.

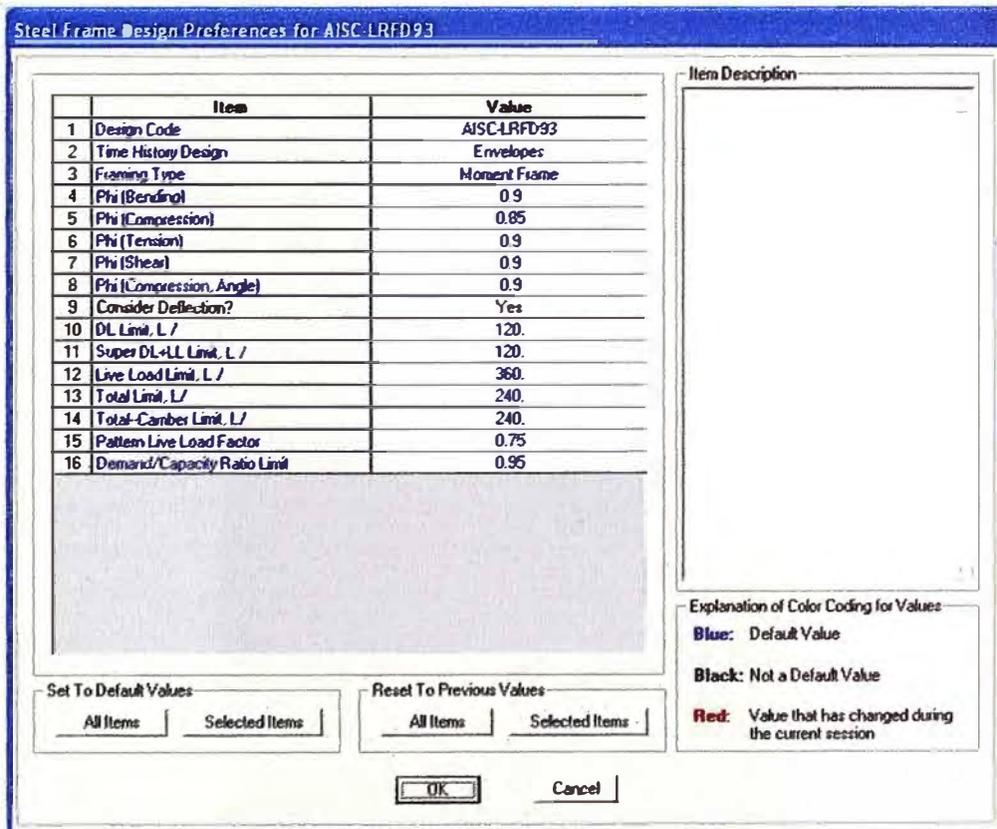


Fig. 4.22: Selección de la Norma de diseño.

4.3.9 Análisis (paso 9)

Luego de haber definido el modelo y las cargas se procede al análisis, para ello se va al menú **Analyze/Set Analysis Options**, y se hace clic en **XZ Plane**; ver Fig. 4.23.

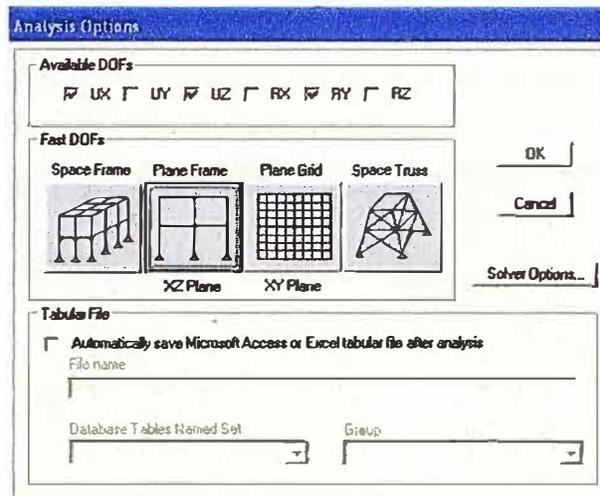


Fig. 4.23: Selección de la Opción de análisis.

Luego en *Analyze/Set Analysis Cases to Run*, se selecciona **DEAD**, luego se hace clic en *Run/Do Not Run All* y luego clic en *Run Now*; tal como se muestra en la Fig. 4.24.

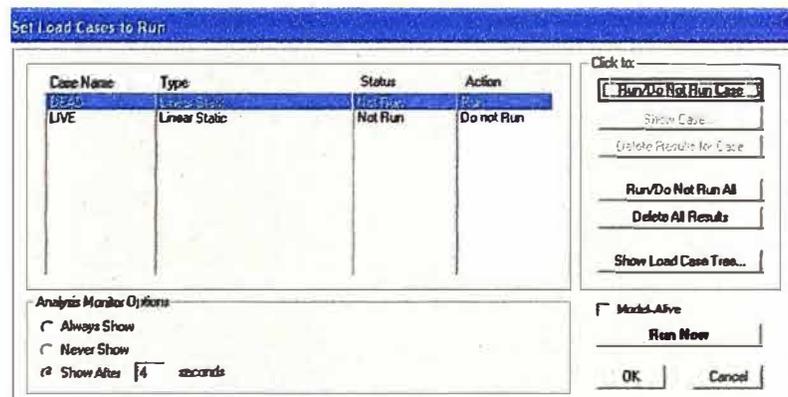


Fig. 4.24: Selección de casos de Análisis, DEAD run.

Seguidamente se aprecia, en la Fig. 4.25, la deformación debida al peso.

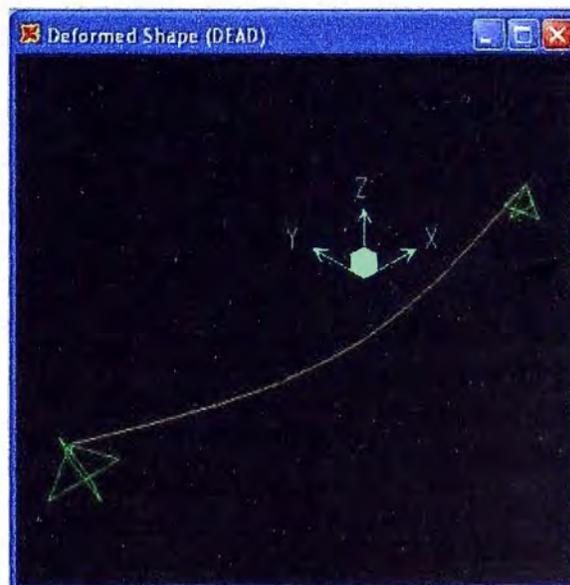


Fig. 4.25: Deformación debida al peso.

Para ver la deformación de la carga viva, se va al menú **Analyze/Set Analysis Cases to RUN**, se selecciona **LIVE**, luego se hace clic en **Run/Do Not Run All** y luego clic en **Run Now**; tal como se muestra en la Fig. 4.26.

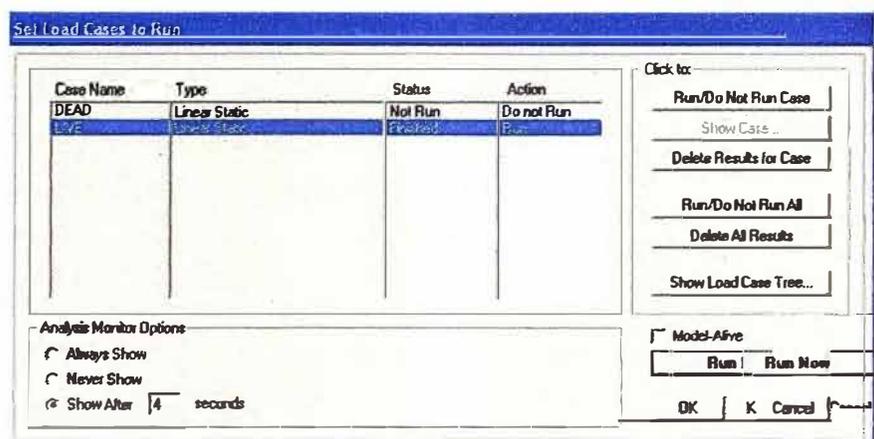


Fig. 4.26: Selección de casos de Análisis, LIVE run.

Seguidamente se aprecia, en la Fig. 4.27, la deformación debida a la carga viva (F_{m3}).



Fig. 4.27: Deformación debido a la carga viva.

4.3.10 Resultados (paso 10)

Durante en análisis de la carga muerta o carga viva, ir al menú **Display/Show Forces/Stesses/Joints**, en el cual se puede ver las reacciones en los apoyos debido a las cargas; ver la Fig. 2.28.

También, durante en análisis de la carga muerta o carga viva, se puede ir al menú **Display/Show Forces/Stesses/Frames/Cables**, para el caso de carga muerta (peso), se debe de seleccionar **Shear 2-2**, y para el caso de carga viva, **Shear 3-3** (si la fuerza F_{m3} es perpendicular al peso); tal como se puede ver el diagrama de carga Fig. 2.29.

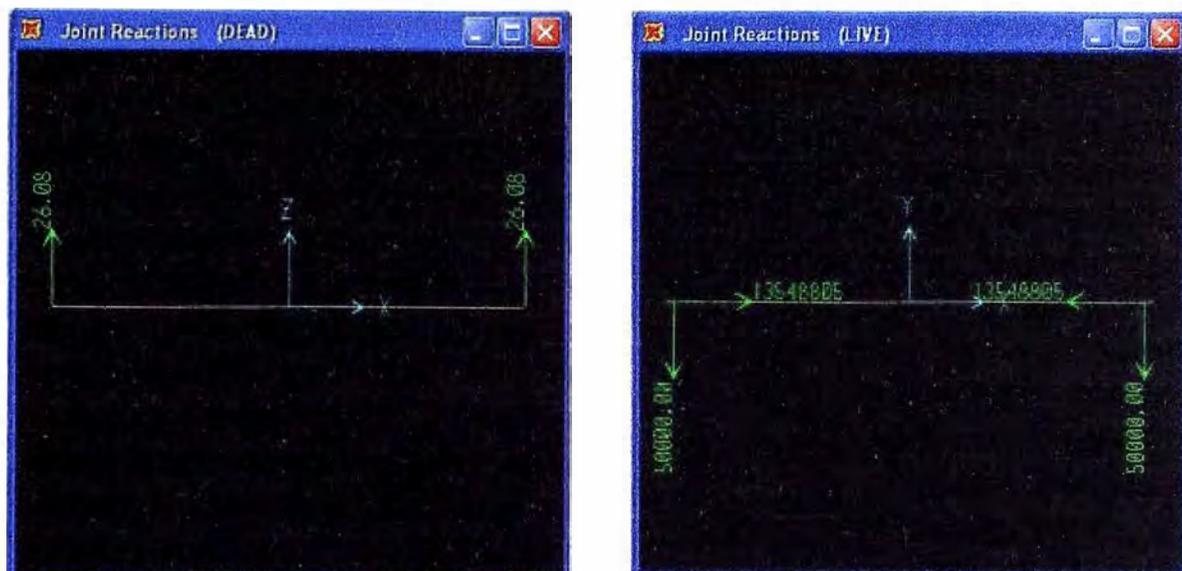


Fig. 4.28: Reacciones en los apoyos.

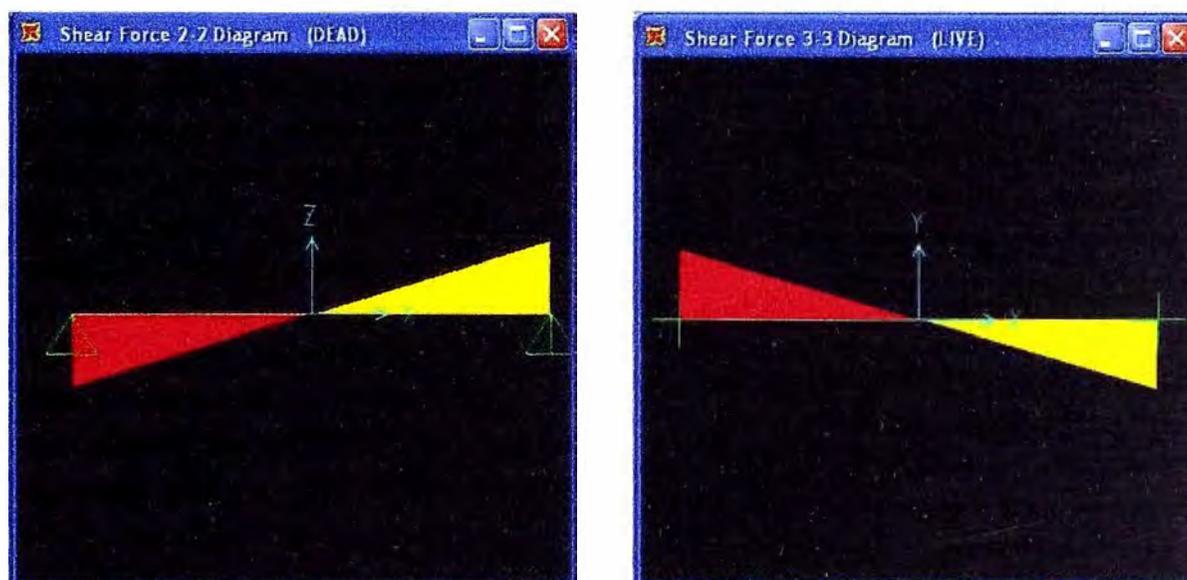


Fig. 4.29: Diagrama de cargas.

Estos resultados deben ser comparados con los valores obtenidos de los cálculos hechos por el programa BUSBAR 865 v1.0; ver Fig. 4.30.



Detallado	Valor límite
104.3	375
1080.4	2000
2971.2	4000

Fig. 4.30: Comparación de resultados.

Tener en cuenta, que el SAP2000 considera el peso en las reacciones de los soportes, cuando la fuerza electromagnética está en la misma dirección de la gravedad.

CAPÍTULO V APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

5.1 Ejemplo 1

Una importante industria requiere adquirir un Banco de Condensadores, para reducir el incremento de potencia reactiva de su carga, de tales características:

- Potencia reactiva a compensar: 250 kVAR.
- Tensión de operación: 380 V.
- Frecuencia de la red: 60 Hz.
- Interruptor Automático con poder de ruptura de 65 kA.
- Sistema de Barras Principal de la misma capacidad del interruptor.

Una empresa fabricante de tableros eléctricos tiene entre sus estándares, un Banco de Condensadores de tales características:

- Potencia reactiva: 250 kVAR.
- Tensión de operación: 380 V.
- Frecuencia de la red: 60Hz.
- Interruptor Automático, con poder de ruptura de 50 kA.
- Sistema de Barras Principal de la misma capacidad del interruptor.

El problema consiste en encontrar alternativas de solución que permitan mejorar la capacidad de cortocircuito del Sistema de Barras del tablero estándar y cumplir con los requerimientos del cliente.

5.1.1 Datos del Sistema de Barras Principal estándar

En la Fig. 5.1, se muestran los datos del Sistema de Barras Principal estándar.

Datos			Rp0.2 (N/mm ²)
			Min Max
Sección del conductor:	mm ²	10x30	
Material del conductor:		E-Cu-F30	
Acabado del conductor:		Pintado	
Disposición de barras:		— — —	
Capacidad del conductor:	A	676	
Corriente de cortocircuito trifásica:	KA	50,0	
Corriente de cortocircuito pico:	KA	105,0	
Número de tramos:		1	
Distancia entre soportes:	mm	425	
Distancia entre conductores:	mm	70	
Tipo de soporte:	A	AP 1.0KV / 1000Kg	
	B	AP 1.0KV / 1000Kg	

Fig. 5.1: Datos del Sistema de Barras Principal estándar.

En la Fig. 5.2, se muestra la ubicación del Sistema de Barras Principal dentro del Banco de Condensadores Estándar.

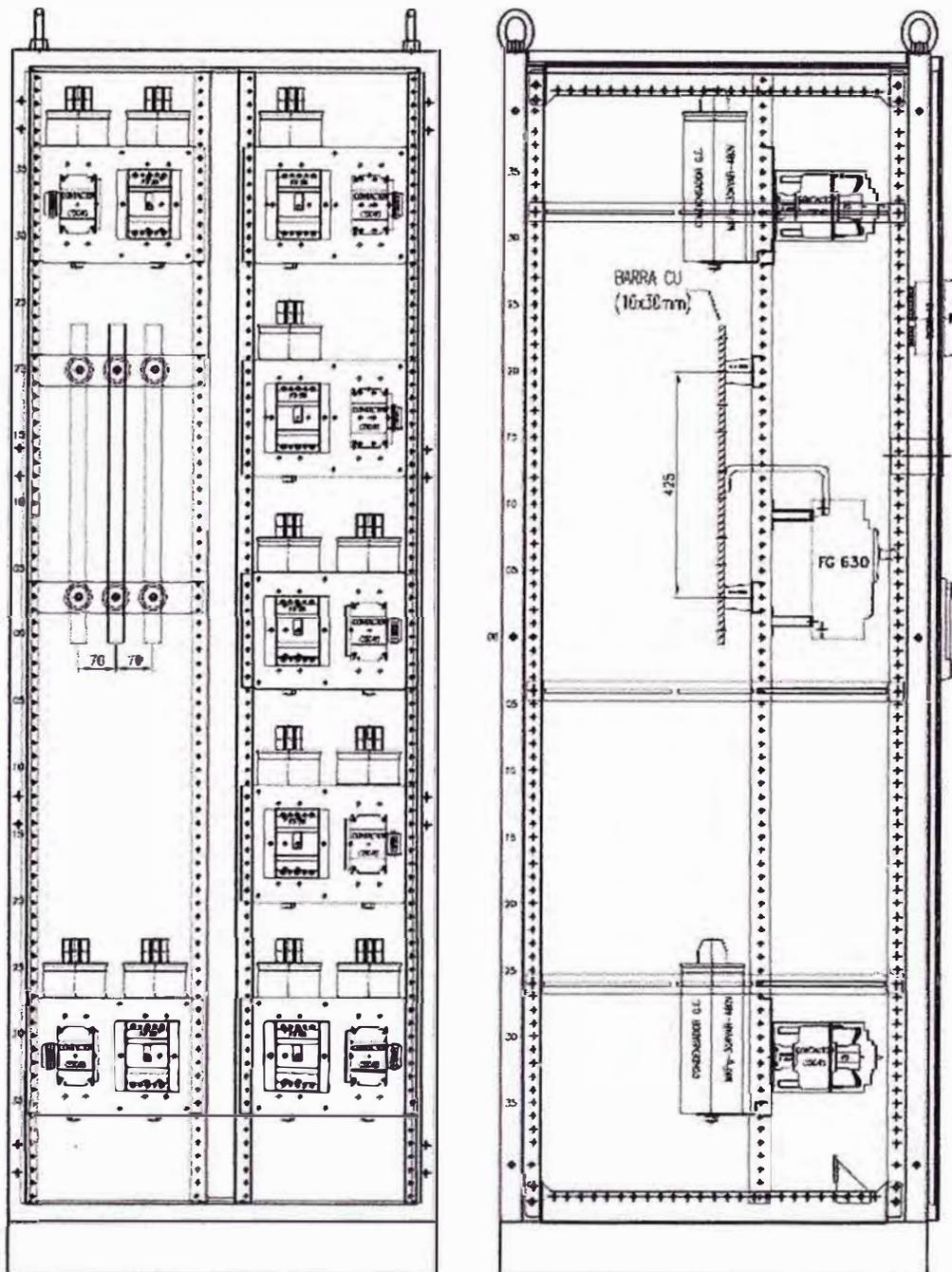


Fig. 5.2: Ubicación del Sistema de Barras dentro del Tablero Eléctrico.

5.1.2 Desarrollo del problema

En la Tabla N° 3.2, se observa que la barra de 10x30 para el caso $a = 70$ mm tiene una capacidad de 28,2 kA; cuando la distancia entre los aisladores porta barras es igual $L = 1$ m. Luego, para $L = 0,425$ m la capacidad de la barra 10x30 es:

$$I_k(L = 0,425 \text{ m}) = (28,2 \text{ kA}) \left(\frac{1,000 \text{ m}}{0,425 \text{ m}} \right)$$

$$I_k(L = 0,425 \text{ m}) = 66,3 \text{ kA}$$

Analizando la ecuación (3.2), se tiene que considerar la corrección del factor n ya que I_k es mayor a 50 kA (ver Tabla N° 2.2):

$$I_k(L = 0,425 \text{ m}) = (66,3 \text{ kA}) \left(\frac{2,1}{2,2} \right)$$

$$I_k(L = 0,425 \text{ m}) = 63,4 \text{ kA}$$

Como se puede ver del resultado anterior, el sistema de barras del tablero estándar no tiene la capacidad de soportar la corriente de cortocircuito de 65 kA. Por lo tanto, es necesario hacer algunas modificaciones.

5.1.3 Alternativas de solución

a) Alternativa 1

Aplicando el criterio de variación de la distancia entre fases, de la Tabla N° 3.2, la capacidad de la barra de 10x30 para $a = 90 \text{ mm}$ es 32.0 kA; luego para $L = 0,425 \text{ m}$:

$$I_k(L = 0,425\text{m}) = (32,0 \text{ kA}) \left(\frac{1,000 \text{ m}}{0,425 \text{ m}} \right) \left(\frac{2,1}{2,2} \right)$$

$$I_k(L = 0,425\text{m}) = 72,0 \text{ kA}$$

Con la ayuda del programa BUSBAR 865 v1.0 se verifica los resultados; tal como se puede apreciar en la Fig. 5.3.

Datos				Rp0.2 (N/mm ²)	
	mm ²	10x30		Min	Max
Sección del conductor:		E-Cu-F30		250	380
Material del conductor:		Pintado			
Acabado del conductor:		---			
Disposición de barras:					
Capacidad del conductor:	A	676			
Corriente de cortocircuito trifásica:	KA	65,0			
Corriente de cortocircuito pico:	KA	143,0			
Número de tramos:		1			
Distancia entre soportes:	mm	425			
Distancia entre conductores:	mm	90			
Tipo de soporte:	A	AP 1.0KV / 1000Kg			
	B	AP 1.0KV / 1000Kg			
Efectos mecánicos			Simplificado	Detallado	Valor límite
El esfuerzo de flexión calculado σ_m es:	N/mm ²		301,2	301,2	375
Fuerza en el soporte externo (A):	kg		867,9	867,9	1000
Fuerza en el soporte interno (B):	kg		867,9	867,9	1000
Efectos térmicos					
Densidad de corriente de cortocircuito:	A/mm ²			344,5	1062,9

Hay que revisar el diseño

Fig. 5.3: Calculo para $L = 0,425 \text{ m}$ y $a = 90 \text{ mm}$.

Del cuadro anterior se observa que la barra tiene una buena respuesta ante los efectos de la corriente de cortocircuito, pero los aisladores porta barras no ($F.C < 1,2$).

$$F.C(\text{barra}) = \frac{375}{301,2} = 1,24; F.C(\text{aislador}) = \frac{1000}{867,9} = 1,15$$

Haciendo los cálculos nuevamente con la ayuda del BUSBAR 865 v1.0, para una distancia entre fases igual a $a = 95$ mm, se obtiene el resultado mostrado en la Fig. 5.4.

Datos				
Sección del conductor:	mm ²	10x30	Rp0.2 (N/mm ²)	
Material del conductor:		E-Cu-F30	Min	Max
Acabado del conductor:		Pintado	250	360
Disposición de barras:		---		
Capacidad del conductor:	A	676		
Corriente de cortocircuito trifásica:	KA	65,0		
Corriente de cortocircuito pico:	KA	143,0		
Número de tramos:		1		
Distancia entre soportes:	mm	425		
Distancia entre conductores:	mm	95		
Tipo de soporte:	A	AP 1.0KV / 1000Kg		
	B	AP 1.0KV / 1000Kg		
Efectos mecánicos		Simplificado	Detallado	Valor límite
El esfuerzo de flexión calculado σ_m es:	N/mm ²	284,9	284,9	375
Fuerza en el soporte externo (A):	kg	829,8	820,8	1000
Fuerza en el soporte interno (B):	kg	829,8	820,8	1000
Efectos térmicos				
Densidad de corriente de cortocircuito:	A/mm ²		344,5	1062,9

El Sistema de Barras Principal soporta los efectos de la corriente de cortocircuito de 65kA

Fig. 5.4: Calculo para $L = 0,425$ m y $a = 95$ mm.

Del cuadro anterior se observa que la barra tiene una buena respuesta ante los efectos de la corriente de cortocircuito, al igual que los aisladores portabarras ($F.C = 1,2$).

$$F.C(\text{barra}) = \frac{375}{284,9} = 1,32; F.C(\text{aislador}) = \frac{1000}{829,8} = 1,20$$

b) Alternativa 2

En la alternativa anterior se notó que, para $a = 90$ mm y $L = 0,425$ m, la barra de 10x30 tiene la capacidad de resistir la corriente de cortocircuito de 65kA; pero los aisladores portabarras no.

Aplicando el criterio de reubicación de aisladores portabarras, para $L = 0,400$ m y manteniendo el valor de $a = 90$ mm, el programa BUSBAR 865 v1.0 obtiene el siguiente resultado; ver Fig. 5.5.

Datos			Rp0.2 (N/mm ²)		
	mm ²	10x30	Min	Max	
Sección del conductor:		10x30	250	360	
Material del conductor:		E-Cu-F30			
Acabado del conductor:		Pintado			
Disposición de barras:		— — —			
Capacidad del conductor:	A	676			
Corriente de cortocircuito trifásica:	KA	65,0			
Corriente de cortocircuito pico:	KA	143,0			
Número de tramos:		1			
Distancia entre soportes:	mm	400			
Distancia entre conductores:	mm	90			
Tipo de soporte:	A	AP 1.0KV / 1000Kg			
	B	AP 1.0KV / 1000Kg			
Efectos mecánicos			Simplificado	Detallado	Valor límite
El esfuerzo de flexión calculado σ_m es:	N/mm ²		266,8	266,8	375
Fuerza en el soporte externo (A):	kg		881,6	816,9	1000
Fuerza en el soporte interno (B):	kg		881,6	816,9	1000
Efectos térmicos					
Densidad de corriente de cortocircuito:	A/mm ²			344,5	1062,9

El Sistema de Barras Principal soporta los efectos de la corriente de cortocircuito de 65kA

Fig. 5.5: Calculo para L = 0.400 m y a = 90 mm.

Del cuadro anterior se obtiene:

$$F.C(\text{barra}) = \frac{375}{266,8} = 1,40; F.C(\text{aislador}) = \frac{1000}{829,8} = 1,22$$

5.1.4 Resumen comparativo

Haciendo la comparación técnica entre las alternativas 1 y 2, ver Tabla N° 5.1:

Tabla N° 5.1: Comparación técnica. Ejemplo 1.

Alternativa	F.C (barra)	F.C (aislador)
Alternativa 1	1,32	1,20
Alternativa 2	1,40	1,22

Luego, la comparación económica; ver Tabla N° 5.2:

Tabla N° 5.1: Comparación económica. Ejemplo 1.

Alternativa	Trabajo adicional	Horas hombre	Costo (\$)
Alternativa 1	2 agujeros en c/soporte de aisladores.	0,40	3,00
Alternativa 2	2 agujeros en c/soporte de aisladores. 1 agujero adicional en c/barra de fase.	1,00	7,00

Para ambas alternativas, se tiene que adicionar el costo por cambio de interruptor de mayor poder de corte (65 kA).

Analizando las alternativas, se concluye que la alternativa 1 es la más conveniente, tanto en la parte técnica como la económica. En la Fig. 5.6, se puede ver el montaje final del Sistema de Barras Principal dentro del Banco de Condensadores.

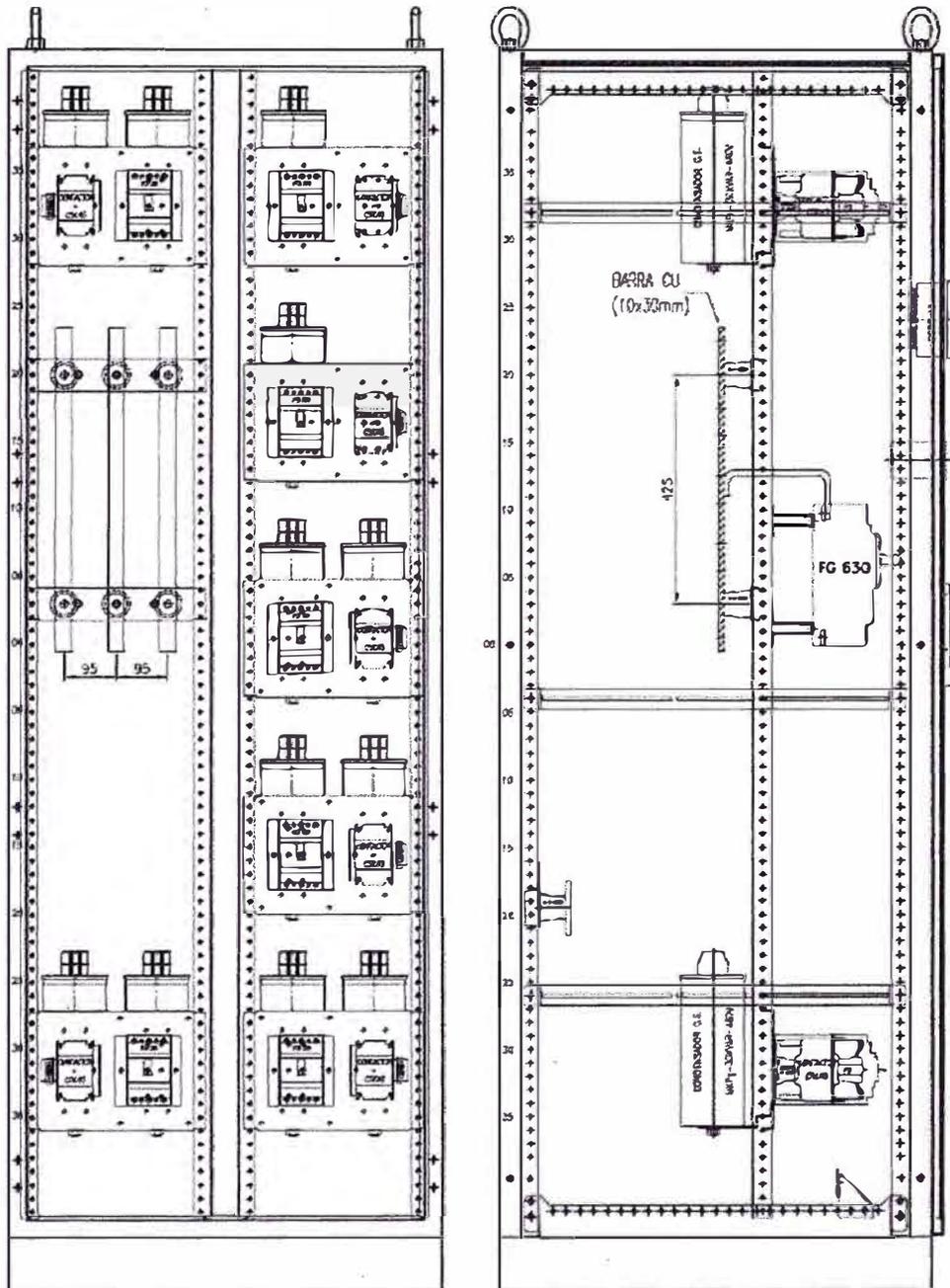


Fig. 5.6: Montaje final del Sistema de Barras Principal.

5.2 Ejemplo 2

Diseñar un Sistema de Barras Principal con capacidad de conducción de 1800 A y una respuesta a los cortocircuitos de 85 kA. El Sistema de Barras Principal será montado a lo largo de tres columnas de 800 mm de ancho cada uno.

5.2.1 Concepción del problema

Considerando el caso de las barras pintadas, se tienen las siguientes alternativas para conseguir una capacidad de conducción de 1800 A.

- Una barra de 10x100 tiene una capacidad de 1810 A
- Dos barras de 10x60 tienen una capacidad de 1960 A

Se tiene que analizar, cual de las dos alternativas es la más conveniente.

a) Alternativa 1

En la pestaña Dat n = 1, del programa BUSBAR 865 v1.0, se ingresan los siguientes datos:

- Sección y material del conductor: 1-10x100 (E-Cu-F30).
- Temperatura antes del cortocircuito: 65 °C.
- Temperatura después del cortocircuito: 170 °C.
- Disposición de perfiles: horizontal.
- Distancia inicial entre aisladores adyacentes, L = 720 mm (ver 3.5.5).
- Distancia inicial entre fases, a = 120 mm (ver Tabla N° 3.24).
- Número de tramos: 3.
- Aislador portabarras exterior, A: 1-1,0 KV/1000 kg.
- Aislador portabarras interior, B: 2-1,0 KV/1000 kg.
- Corriente de cortocircuito: 85 KA.
- Duración del cortocircuito: 0,1 s.

En la Fig. 5.7, se muestra los resultados dados en la pestaña Res n = 1.

Efectos mecánicos		Simplificado	Detallado	Valor límite
El esfuerzo de flexión calculado σ_m es:	N/mm ²	167,1	167,1	375
Fuerza en el soporte externo (A):	kg	2982,0	1730,2	1000
Fuerza en el soporte interno (B):	kg	8200,5	4758,0	2000
Efectos térmicos				
Densidad de corriente de cortocircuito:	A/mm ²		90,8	212,6

Hay que revisar el diseño

Fig. 5.7: Resultado inicial de la alternativa 1.

Se nota que la barra tiene una respuesta favorable ante los esfuerzos mecánicos de cortocircuito (F.C = 2,24), pero los soportes necesitan reforzarse (F.C < 1,0).

Aumentando los aisladores porta barras a 2 - 1,0 KV/1000 kg y 4 - 1,0 KV/1000 kg en los extremos A y B respectivamente, se tiene el siguiente resultado, tal como se aprecia en la Fig. 5.8.

Efectos mecánicos		Simplificado	Detallado	Valor límite
El esfuerzo de flexión calculado σ_m es:	N/mm ²	167,1	167,1	375
Fuerza en el soporte externo (A):	kg	2982,0	1730,2	2000
Fuerza en el soporte interno (B):	kg	8200,5	4758,0	4000
Efectos térmicos				
Densidad de corriente de cortocircuito:	A/mm ²		90,8	212,6
Hay que revisar el diseño				

Fig. 5.8: Segundo resultado de la alternativa 1.

Como se observa, los soportes aún no resisten los esfuerzos de cortocircuito. Ahora, se tiene que variar la distancia entre fases hasta lograr el resultado deseado. Para $a = 175$ mm; ver la Fig. 5.9.

Efectos mecánicos		Simplificado	Detallado	Valor límite
El esfuerzo de flexión calculado σ_m es:	N/mm ²	104,3	104,3	375
Fuerza en el soporte externo (A):	kg	2917,2	1080,4	2000
Fuerza en el soporte interno (B):	kg	8022,3	2971,2	4000
Efectos térmicos				
Densidad de corriente de cortocircuito:	A/mm ²		90,8	212,6
El Sistema de Barras Principal soporta los efectos de la corriente de cortocircuito de 85kA				

Fig. 5.9: Resultado final de la alternativa 1.

En la Fig. 5.10, se puede apreciar el montaje final del Sistema de Barras Principal dentro de las tres columnas (vista superior).

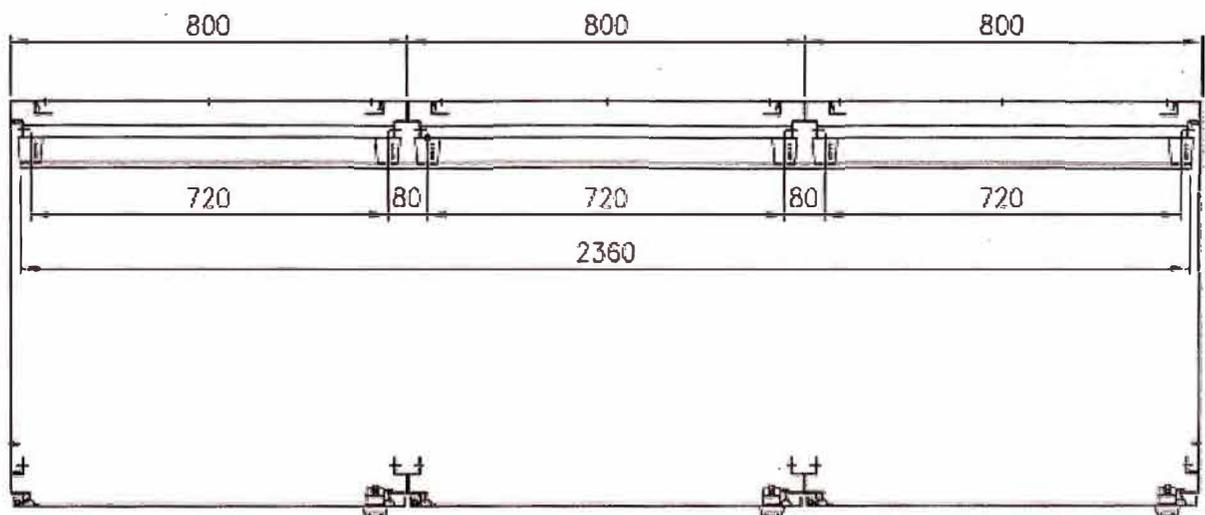


Fig. 5.10: Montaje final del Sistema de Barras Principal, alternativa 1.

b) Alternativa 2

En la pestaña Dat n > 1 del programa BUSBAR 865 v1.0, se ingresan los siguientes datos:

- Sección y material del conductor: 2-10x60 (E-Cu-F30).
- Temperatura antes del cortocircuito: 65 °C.
- Temperatura después del cortocircuito: 170 °C.
- Disposición de perfiles: horizontal.
- Distancia inicial entre aisladores adyacentes, L = 720 mm (ver 3.5.5).
- Número de piezas de conexión: 1, Ls = 360 mm.
- Distancia inicial entre fases, a = 80 mm (ver Tabla N° 3.24).
- Número de tramos: 3.
- Aislador portabarras exterior, A: 1-1,5 KV/1300 kg.
- Aislador portabarras interior, B: 2-1,0 KV/1300 kg.
- Corriente de cortocircuito: 85 KA.
- Duración del cortocircuito: 0,1 s.

Luego, se puede ver el resultado inicial en la pestaña Res n > 1; ver Fig. 5.11.

Efectos mecánicos		Simplificado	Detallado	Valor límite
El esfuerzo de flexión calculado σ_{int} es:	N/mm ²	390,9	390,9	375
Fuerza en el soporte extremo (A):	kg	2402,6	2402,6	1300
Fuerza en el soporte interno (B):	kg	6607,1	6607,1	2600
Efectos térmicos				
Densidad de corriente de cortocircuito:	A/mm ²		75,7	117,3
Hay que revisar el diseño				

Fig. 5.11: Resultado inicial de la alternativa 2.

Se observa, que tanto la barra como los soportes no resisten los esfuerzos de cortocircuito. Aumentando la distancia entre fases a = 175 mm, se tiene; ver Fig. 5.12.

Efectos mecánicos		Simplificado	Detallado	Valor límite
El esfuerzo de flexión calculado σ_{int} es:	N/mm ²	207,1	207,1	375
Fuerza en el soporte extremo (A):	kg	1431,4	1032,5	1300
Fuerza en el soporte interno (B):	kg	3936,3	2839,2	2600
Efectos térmicos				
Densidad de corriente de cortocircuito:	A/mm ²		75,7	117,3
Hay que revisar el diseño				

Fig. 5.12: Segundo resultado de la alternativa 2.

Como se observa, el soporte interno aún no resiste los esfuerzos de cortocircuito, por lo tanto, se agrega un aislador 1,5 KV/1300 kg para aumentar la resistencia del soporte; ver Fig. 5.13.

Efectos mecánicos		Simplificado	Detallado	Valor límite
El esfuerzo de flexión calculado σ_{tr} es:	N/mm ²	207,1	207,1	375
Fuerza en el soporte extremo (A):	kg	1431,4	1032,5	1300
Fuerza en el soporte interno (B):	kg	3936,3	2839,2	3900
Efectos térmicos				
Densidad de corriente de cortocircuito:	A/mm ²		75,7	117,3

El Sistema de Barras Principal soporta los efectos de la corriente de cortocircuito de 85kA

Fig. 5.13: Resultado final de la alternativa 2.

En la Fig. 5.14, se puede apreciar el montaje final del Sistema de Barras Principal.

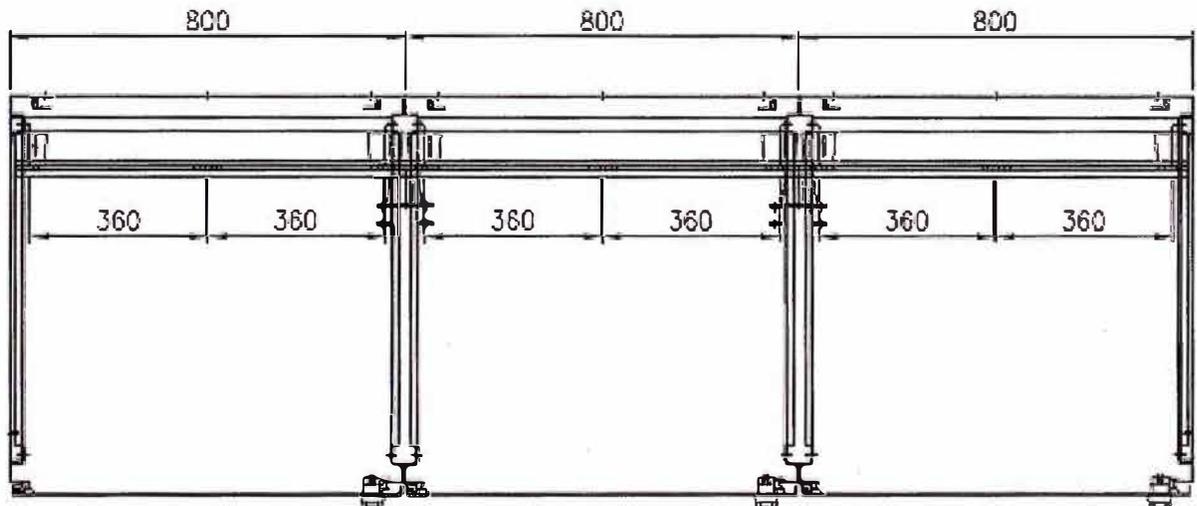


Fig. 5.14: Montaje final del Sistema de Barras Principal alternativa 2.

5.2.2 Resumen comparativo

Haciendo la comparación técnica entre las alternativas 1 y 2; ver tabla N° 5.3:

Tabla N° 5.3: Comparación técnica. Ejemplo 2.

Opción	F.C (barra)	F.C (aislador A)	F.C (aislador B)
Alternativa 1	3,60	1,85	1,35
Alternativa 2	1,80	1,26	1,37

Luego, haciendo la comparación económica de los componentes principales, se tiene:

Tabla N° 5.4: Comparación económica. Ejemplo 2.

Alternativa	Barra (m)	Aisladores (unidad)	Costo por Barra (\$)	Costo por Aisladores (\$)	Subtotal (\$)
Alternativa 1	7,08 m	36	504,10	60,12	564,22
Alternativa 2	14,28 m	24	610,04	84,00	694,04

También hay que tomar en cuenta en la evaluación económica el costo de la base de montaje y el costo de la instalación dentro de la columna; ver Tabla N° 5.5.

Tabla N° 5.5: Costo de montaje. Ejemplo 2.

Opción	Base de Montaje (\$)	Costo por montaje (\$)
Alternativa 1	166,86	42,00
Alternativa 2	83,43	35,00

Haciendo un cuadro resumido para evaluar el costo total entre las alternativas 1 y 2; ver Tabla N° 5.6.

Tabla N° 5.6: Comparación final. Ejemplo 2.

Opción	Costo Total (\$)
Alternativa 1	773,08
Alternativa 2	812,47

Analizando las tablas anteriores, se concluye que la primera alternativa es técnica y económicamente la más conveniente.

5.2.3 Simulación de la alternativa elegida

Siguiendo el procedimiento indicado en los pasos del 1 al 6, se obtiene la vista en 2-dimensiones y en 3-dimensiones del Sistema de Barras Principal (sólo se modela una fase); tal como se aprecia en la Fig. 5.15.

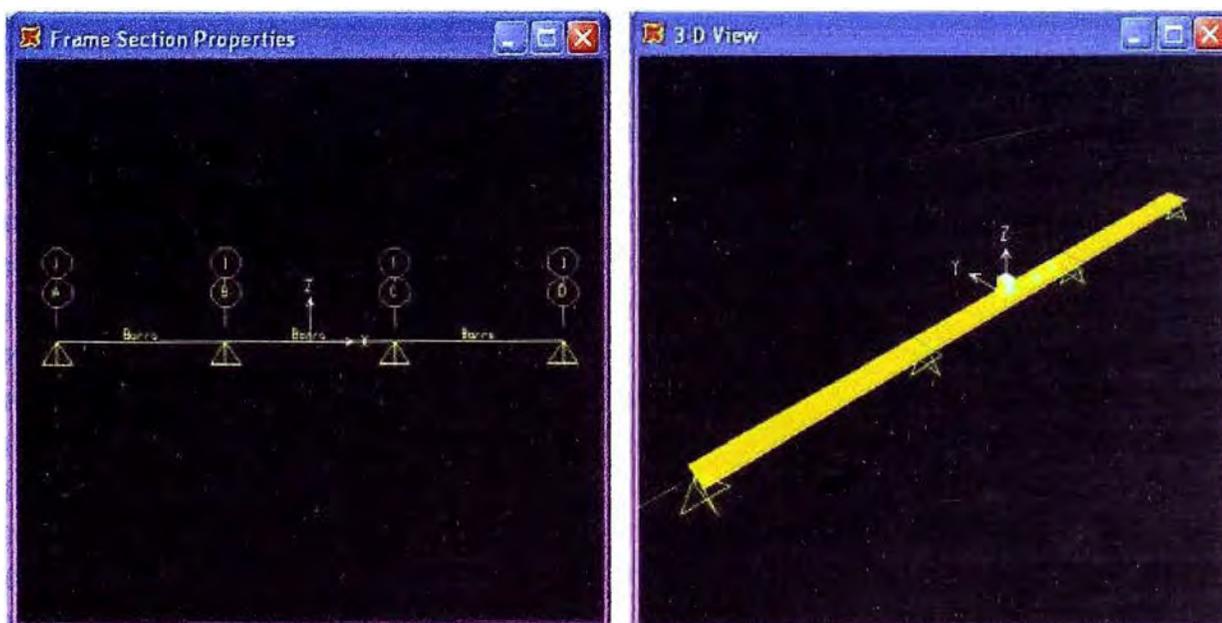


Fig. 5.15: Vista 2D y 3D

Luego, en el paso 7, se le asigna a cada tramo del modelo de sistema de barras la carga distribuida $f_{m3} = 3.75 \text{ kgf/mm}$ (es el resultado de dividir F_{m3} en kgf por 720 mm) en la dirección del peso; tal como se ve en la Fig. 5.16.

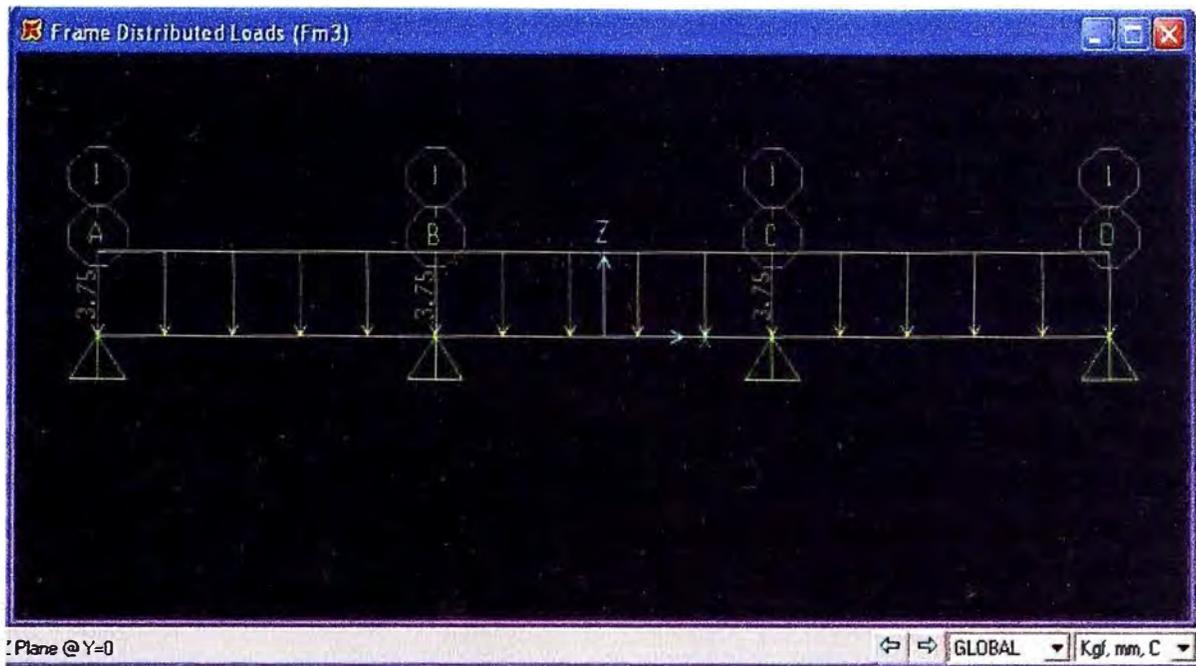


Fig. 5.16: Carga distribuida a lo largo de la barra.

En la Fig. 5.17 (paso 8 y 9), se pueden ver las reacciones en los aisladores debido al peso y a la fuerza electromagnética F_{m3} (fuerza distribuida).

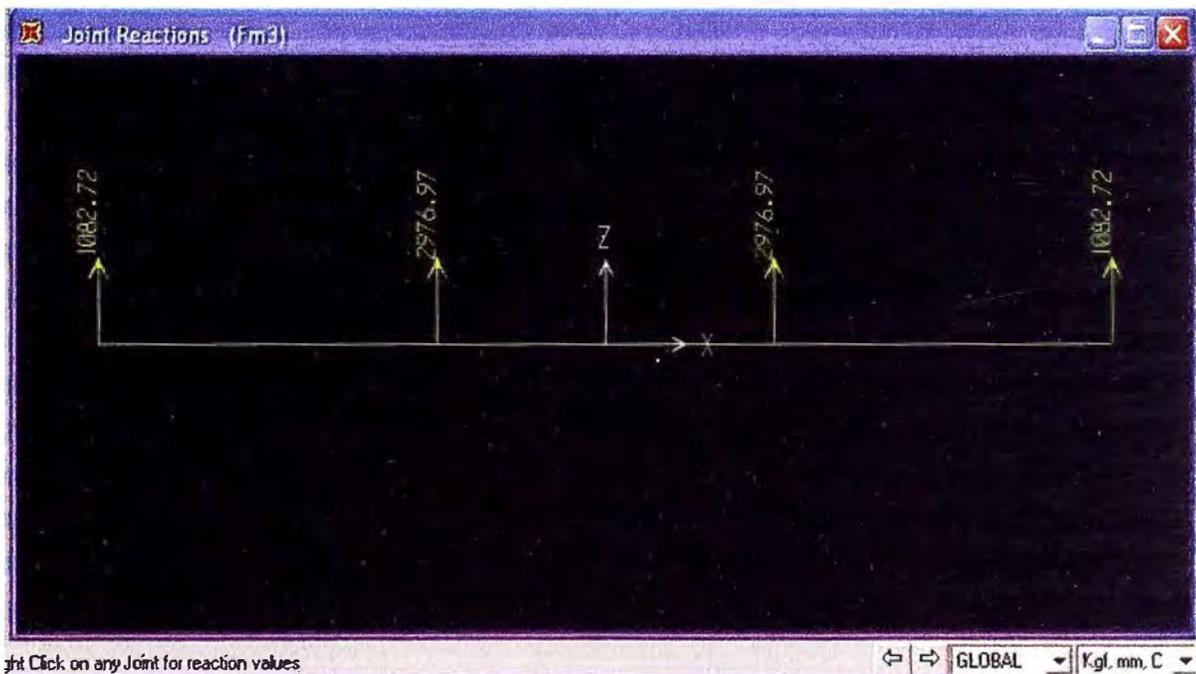


Fig. 5.17: Reacciones en los aisladores.

Comparando estos resultados con los obtenidos en el BUSBAR 865, ver Tabla N° 5.7:

Tabla N° 5.7: Comparación de resultados

Extremo (A)	1080,40	1082,72
Interior (B)	2971,20	2976,97

Recordar que el SAP2000 considera en las reacciones el peso de la barra.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En forma general, se ha logrado exponer los procedimientos para diseñar un Sistema de Barras Principal en baja tensión de una manera didáctica y sencilla; convirtiéndose en un documento técnico de referencia. Al detalle se tiene lo siguiente:

1. Del análisis de las ecuaciones, tablas y gráficas dadas en las normas IEC 60865 – 1 y DIN – EN 61660 – 2, se concluye que, los arreglos de barras en disposición horizontal (el ancho de la barra paralelo a la fuerza electromagnética) ofrecen mayor resistencia mecánica al paso de la corriente de cortocircuito.
2. También se aprecia que la ubicación de espaciadores entre los sub-conductores aumenta la resistencia mecánica al paso de la corriente de cortocircuito de las barras, cuando estas están dispuestas en forma vertical (el ancho de la barra perpendicular a la fuerza electromagnética).
3. Las alternativas de solución: reubicación y modo de empleo de los aisladores porta barras, y la variación de la distancia entre fases, permiten en forma rápida y económica, mejorar la resistencia mecánica a los cortocircuitos de un Sistema de Barras Principal prefabricado.
4. Los criterios para el diseño de un Sistema de Barras Principal dados en el presente informe ayudan a determinar la mejor alternativa de solución que garantice un buen margen de seguridad y un costo de fabricación y montaje económico.
5. El programa elaborado para el presente informe (BUSBAR 865 v1.0) ayuda a calcular en forma rápida los efectos de la corriente de cortocircuito. Permitiendo evaluar varias alternativas de solución y escoger la opción más conveniente. También el programa compara los métodos de cálculo dados en la norma IEC 60865 – 1: simplificado y detallado. En la cual se observa que el primero implica, en algunos casos, un sobre dimensionamiento de las barras y los aisladores porta barras, y por tanto, un mayor costo de fabricación.
6. El programa SAP2000 v14 es útil, para la verificación de los resultados obtenidos en el programa BUSBAR 865 v1.0, ya que permite observar de manera sencilla todas reacciones en los aisladores porta barras.

Recomendaciones

1. Dado la amplitud del tema, el presente informe se limitó a estudiar el caso de un Sistema de Barras Principal en arreglo coplanar, se recomienda para futuros trabajos, analizar los efectos de la corriente de cortocircuito para Sistemas de Barras Principales en arreglo triangular; es decir, donde cada fase está ubicado en los vértices de un triángulo.
2. El procedimiento para el diseño de un Sistema de Barras Principal dados en el presente informe se pueden desarrollar en Matlab o programas similares, aplicando elemento finito y algoritmos de optimización, para mejorar el programa hecho en Excel para el presente informe.
3. El programa SAP2000 v14 usado en el presente informe, puede ser reemplazado por otro programa que simule el comportamiento de la barra durante un cortocircuito, tomando en cuenta las propiedades físicas de los materiales de los conductores y los tiempos de apertura de los interruptores.

ANEXOS

ANEXO A

Algoritmo del programa BUSBAR 865 v1.0

A.2 Algoritmo para un Sistema de Barras Principal de varios conductores por fase

En la Fig. A.2, se muestra el algoritmo general para calcular los esfuerzos mecánicos y térmicos, para Sistemas de Barras Principal de varios conductores por fase.

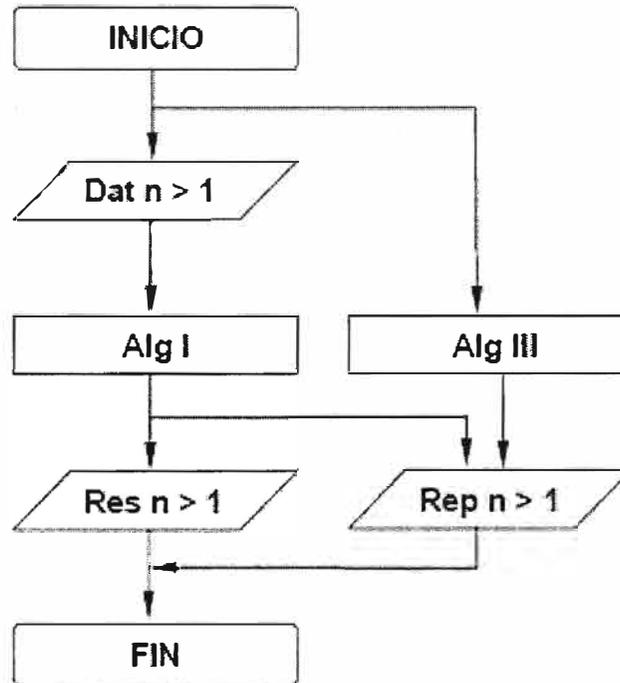


Fig. A.2: Algoritmo para un Sistema de Barras Principal de varios conductores por fase.

Dat n > 1

Se ingresan los datos: sección del conductor, material del conductor, número de de tramos, número de conductores por fase, distancia entre aisladores, etc., para realizar los cálculos en **Alg I**; ver la Fig. 4.3.

Alg I

Algoritmo principal del programa, encargado de realizar los cálculos que luego van a ser mostrados en **Res n > 1** y **Rep n > 1**; está basado en las ecuaciones, tablas y gráficos de las normas IEC 60865 – 1 y la DIN – EN 61660 – 2. Para acceder a la fuente de Alg I, ir al menú **Formato/Hoja/Mostrar** y seleccionar Alg I.

Alg III

Algoritmos secundario del programa, que se encarga de mostrar en **Rep n > 1**, el texto en español o inglés, según el idioma seleccionado en **Dat n > 1**. Para acceder a la fuente de Alg III, ir al menú **Formato/Hoja/Mostrar** y seleccionar Alg III.

Res n > 1

Muestra los resultados de los cálculos hecho por **Alg I** en forma resumida; ver la Fig. 4.5.

Res n > 1

Muestra los resultados de los cálculos hecho por **Alg I** en forma detallada; ver la Fig. 4.7.

A.1 Algoritmo para un Sistema de Barras Principal de un conductor por fase

En la Fig. A.1, se muestra el algoritmo general para calcular los esfuerzos mecánicos y térmicos, para Sistemas de Barras Principal de un conductor por fase.

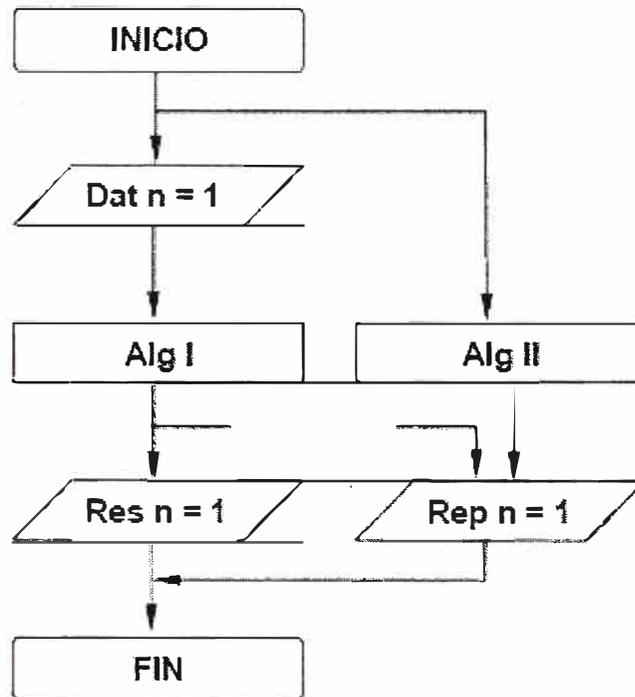


Fig. A.1: Algoritmo para un Sistema de Barras Principal de un conductor por fase.

Dat n = 1

Se ingresan los datos: sección del conductor, material del conductor, distancia entre aisladores, número de de tramos, distancia entre fases, etc., para realizar los cálculos en **Alg I**; ver la Fig. 4.2.

Alg I

Algoritmo principal del programa, encargado de realizar los cálculos que luego van a ser mostrados en **Res n = 1** y **Rep n = 1**; está basado en las ecuaciones, tablas y gráficos de las normas IEC 60865 – 1 y la DIN – EN 61660 – 2. Para acceder a la fuente de Alg I, ir al menú **Formato/Hoja/Mostrar** y seleccionar Alg I.

Alg II

Algoritmos secundario del programa, que se encarga de mostrar en **Rep n = 1**, el texto en español o inglés, según el idioma seleccionado en **Dat n = 1**. Para acceder a la fuente de Alg II, ir al menú **Formato/Hoja/Mostrar** y seleccionar Alg II.

Res n = 1

Muestra los resultados de los cálculos hecho por **Alg I** en forma resumida; ver la Fig. 4.4.

Res n = 1

Muestra los resultados de los cálculos hecho por **Alg I** en forma detallada; ver la Fig. 4.6.

ANEXO B

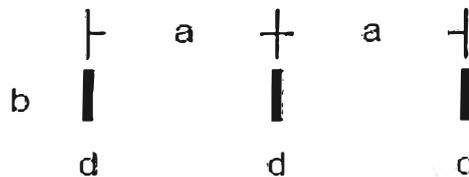
Prueba del BUSBAR 865 v1.0, con un ejemplo de la norma IEC 60865 – 2

CÁLCULO DE LOS EFECTOS DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

PROGRAMA: BUSBAR 865 v1.0 (Según la Norma IEC 865-1 1993)
 CLIENTE: Ejemplo 1 de la IEC 865-2

1. DATOS

Sección del conductor	A	10x60	mm ²
Material del conductor		E-ALMgSi0.5-F17	
Acabado del conductor		Desnudo	
Vista de perfil		111	
Capacidad del conductor	I _n	601	A
Corriente de cortocircuito trifásica	i _{k3}	16.00	kA
Número de tramos		≥ 3	
Distancia entre soportes	L	1000	mm
Distancia entre conductores	a	200	mm
Tipo de soporte externo (A)		E2 1.0KV / 1300Kg	
Tipo de soporte interno (B)		E2 1.0KV / 1300Kg	
Temperatura antes del cortocircuito	θ ₀	65	°C
Temperatura despue del cortocircuito	θ ₃	170	°C
Frecuencia de la red	f	50	Hz
Duracción del cortocircuito	T _k	0.8	s



2. CÁLCULO DE LOS EFECTOS MECÁNICOS

2.1 La corriente pico de cortocircuito:

$$i_{p3} = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot i_{k3} = 30.5 \text{ kA} \quad \kappa = 1.35$$

donde κ se obtiene de la curva dada en IEC 909.

2.2 Distancia efectiva entre los conductores principales:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} = 0.203 \text{ m} \quad ; \quad k_{12} = 0.986$$

ver IEC 865-1, figura 1 para $b/d = 6.00$ y $a/d = 20.00$.

2.3 Máxima fuerza en el conductor principal central:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sqrt{3} i_{p3}^2 \frac{L}{a_m} = 796.7 \text{ N}$$

donde el valor de la permabilidad magnética en el vacío es: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$

3. ESFUERZO EN CONDUCTORES Y FUERZA EN LOS SOPORTES

3.1 Método simplificado

3.1.1 Esfuerzo en conductores:

$$\sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} L}{8Z} = 72.7 \text{ N/mm}^2 ; \quad Z = 1000 \text{ mm}^3$$

$$V_\sigma V_r = 1.00 \quad \text{ver la IEC 865-1, tabla 2}$$

$$\beta = 0.73 \quad \text{ver la IEC 865-1, tabla 3}$$

El juego de barras soporta la fuerza de cortocircuito si:

$$\sigma_m \leq q R_{p0.2} (\text{min}) ; \quad R_{p0.2} (\text{min}) = 120 \text{ N/mm}^2$$

Para una sección rectangular $q = 1.5$, ver IEC 865-1, tabla 4.

$$72.7 \leq 180.0 ; \quad CS = 2.48$$

3.1.2 Fuerza en los soportes:

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3}$$

Según la IEC 865-1, tabla 2 con el valor de: $R_{p0.2} (\text{max}) = 180 \text{ N/mm}^2$

$$\frac{\sigma_m}{0.8 R_{p0.2}} = 0.505 ; \quad 0.37 < \frac{\sigma_m}{0.8 R_{p0.2}} < 1.00$$

Luego:

$$V_F V_r = 1.98$$

Para el soporte externo (A) es con:

$$\alpha_A = 0.4 \quad \rightarrow \quad F_{dA} = 64.4 \text{ kg} \quad \text{ver la IEC 865-1, tabla 3}$$

Para el soporte interno (B) es con:

$$\alpha_B = 1.1 \quad \rightarrow \quad F_{dB} = 177.1 \text{ kg} \quad \text{ver la IEC 865-1, tabla 3}$$

3.2 Método detallado

3.2.1 Frecuencia natural f_c del conductor principal:

$$f_c = \frac{\gamma}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} = 52.3 \text{ Hz} ; \quad \gamma = 3.56 \quad \text{ver la IEC 865-1, tabla 3}$$

$$E = 70000 \text{ N/mm}^2 ; \quad J = 5000 \text{ mm}^4 ; \quad m' = 1.62 \text{ kg/m}$$

La relación f_c/f es 1.05. De la IEC 865-1, figura 4, se obtienen los siguientes valores:

$$V_F = 1.80$$

$$V_\sigma = 1.00$$

$$V_r = 1.00$$

3.2.2 Esfuerzo en conductores:

$$\sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} L}{8Z} = 72.7 \text{ N/mm}^2 ; \quad Z = 1000 \text{ mm}^3$$

$$V_\sigma V_r = 1.00 \\ \beta = 0.73 \quad \text{ver la IEC 865-1, tabla 3}$$

El juego de barras soporta la fuerza de cortocircuito si:

$$\sigma_m \leq qR_{p0.2} (\text{min}) ; \quad R_{p0.2} (\text{min}) = 120 \text{ N/mm}^2$$

Para una sección rectangular $q = 1.5$, ver IEC 865-1, tabla 4.

$$72.7 \leq 180.0 \quad CS = 2.48$$

3.2.2 Fuerza en los soportes:

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3}$$

De 3.2.1: $V_F V_r = 1.80$

Para el soporte externo (A) es con:

$$\alpha_A = 0.4 \quad \rightarrow \quad F_{dA} = 58.5 \text{ kg} \quad \text{ver la IEC 865-1, tabla 3}$$

Para el soporte interno (B) es con:

$$\alpha_B = 1.1 \quad \rightarrow \quad F_{dB} = 161.0 \text{ kg} \quad \text{ver la IEC 865-1, tabla 3}$$

4. CÁLCULO DE LOS EFECTOS TÉRMICOS

4.1 Densidad de corriente de cortocircuito nominal soportado en 1s, para:

$$\theta_b = 65 \text{ }^\circ\text{C} \quad \theta_a = 170 \text{ }^\circ\text{C}$$

S_{th} es encontrado de la IEC 865-1, figura 13b):

$$S_{th} = 77.4 \text{ A/mm}^2 \quad \rightarrow \quad K = 77.4$$

4.2 El equivalente térmico de la corriente de corta duración es:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} = 16.1 \text{ kA} \quad m = 0.01 ; \quad n = 1.00$$

4.3 Densidad de la corriente térmica de cortocircuito:

$$S_{th} = \frac{I_{th}}{A} = 26.8 \text{ A/mm}^2 ; \quad A = 600 \text{ mm}^2$$

El conductor soporta los efectos térmicos si:

$$S_{th} \leq \frac{K}{\sqrt{T_k}}$$

CONCLUSIONES:	Método simplificado	Método detallado	Valor límite	Unidad
Esfuerzo en el conductor principal:	72.7	72.7	180	N/mm ²
Fuerza en soporte externo (A):	64.4	58.5	2600	kg
Fuerza en soporte interno (B):	177.1	161.0	2600	kg
Densidad de la corriente térmica de cortocircuito:		26.8	86.5	A/mm ²
El Sistema de Barras Principal soportará los efectos de la corriente de cortocircuito de 16kA				

En las tablas B.1 y B.2, se hace la comparación de los resultados:

Tabla B.1: Método simplificado

	Unidad	IEC 60865 – 2	BUSBAR 865 v1.0
Esfuerzo en el conductor principal	N/mm ²	73.3	72.7
Fuerza en el soporte extremo (A)	N	633.0	631.1
Fuerza en el soporte extremo (B)	N	1740.0	1735.6

Tabla B.2: Método detallado

	Unidad	IEC 60865 – 2	BUSBAR 865 v1.0
Esfuerzo en el conductor principal	N/mm ²	73.3	72.7
Fuerza en el soporte extremo (A)	N	578.0	573.3
Fuerza en el soporte extremo (B)	N	1590.0	1577.8

La diferencia entre los resultados, se debe a que el programa BUSBAR 865 v1.0 tiene mayor exactitud al calcular.

ANEXO C

Fórmula de generación de algunas gráficas

Para obtener la Fig. 2.15, se toma la ecuación mostrada en la Fig. C.1 del anexo A.2 de la norma IEC 60865 – 1. Donde a, b, y d son: distancia entre fases, ancho de la barra y espesor de la barra (en caso de 2 o más sub-conductores por fase, se considera la suma de los espesores y la separación entre sub-conductores).

$$k_{1s} = \left\{ \left(\frac{(a/d) + 1}{b/d} \right)^3 \ln \frac{[(a/d) + 1]^2 + (b/d)^2}{[(a/d) + 1]^2} + 2 \left(\frac{a/d}{b/d} \right)^3 \ln \frac{(a/d)^2 + (b/d)^2}{(a/d)^2} \left(\frac{(a/d) - 1}{b/d} \right)^3 \right. \\ \left. \ln \frac{[(a/d) - 1]^2 + (b/d)^2}{[(a/d) - 1]^2} + 3 \left[\frac{a/d}{b/d} \ln \frac{[(a/d) + 1]^2 + (b/d)^2}{(a/d)^2 + (b/d)^2} + \frac{1}{b/d} \ln \frac{[(a/d) + 1]^2 + (b/d)^2}{[(a/d) - 1]^2 + (b/d)^2} - \right. \right. \\ \left. \left. \frac{a/d}{b/d} \ln \frac{(a/d)^2 + (b/d)^2}{[(a/d) - 1]^2 + (b/d)^2} \right] + 6 \left[\left(\frac{(a/d) + 1}{b/d} \right)^2 \arctan \frac{b/d}{(a/d) + 1} - 2 \left(\frac{a/d}{b/d} \right)^2 \arctan \frac{b/d}{a/d} + \right. \right. \\ \left. \left. \left(\frac{(a/d) - 1}{b/d} \right)^2 \arctan \frac{b/d}{(a/d) - 1} \right] + 2 \left[\arctan \frac{(a/d) + 1}{b/d} - 2 \arctan \frac{a/d}{b/d} + \arctan \frac{(a/d) - 1}{b/d} \right] \right\} \frac{(a/d)(b/d)}{6}$$

Fig. C.1: Ecuación de Dwight.

Para obtener la Fig. 18, se parte de la ecuación y la tabla mostrada en la Fig. C.2, que es tomada del anexo A. 3.

$$c = \frac{c_c}{\sqrt{1 + \xi_m \frac{m_z}{nm'_s l}}}$$

k	l _s /l	ξ _m	c _c	
			Fig. 3b	Fig. 3c
0	—	0.0	1.0	1.0
1	0,5	2,5	1,0	1,0
2	0,33	3,0	1,48	1,0
2	0,5	1,5	1,75	1,0
3	0,25	4,0	1,75	1,0
4	0,2	5,0	2,14	1,0
5	0,17	6,0	2,46	1,0
6	0,14	7,0	2,77	1,0

Fig. C.2: Factor c.

ANEXO C

Lista de ecuaciones utilizadas

Capítulo 2

$\sqrt{2}E \operatorname{sen}(\omega t + \alpha) = \frac{X}{\omega} \frac{dI_{cc}}{dt} + RI_{cc}$	(2.1)
$I_a = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \operatorname{sen}(\omega t + \alpha - \varphi); \quad \varphi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$	(2.2)
$I_c = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \operatorname{sen}(\varphi - \alpha) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)}$	(2.3)
$I_{cc} = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \left[\operatorname{sen}(\omega t + \alpha - \varphi) - \operatorname{sen}(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \right]$	(2.4)
$\kappa = \operatorname{sen}(\omega t + \alpha - \varphi) - \operatorname{sen}(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)}$	(2.5)
$I_{cc} = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \operatorname{sen}(\omega t)$	(2.6)
$I_{cc} = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \left[\operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \right]$	(2.7)
$\kappa = 1 + e^{-\frac{R}{X}}$	(2.8)
$\kappa = 1.02 + 0.98 e^{-\frac{3R}{X}}$	(2.9)
$I_{cc1} = \sqrt{2}I_k'' \left[\operatorname{sen}(\omega t + \alpha - \varphi) - \operatorname{sen}(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \right]$	(2.10)
$I_{cc2} = \sqrt{2}I_k'' \left[\operatorname{sen}\left(\omega t + \alpha + \frac{2}{3}\pi - \varphi\right) - \operatorname{sen}\left(\alpha + \frac{2}{3}\pi - \varphi\right) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \right]$	(2.11)
$I_{cc3} = \sqrt{2}I_k'' \left[\operatorname{sen}\left(\omega t + \alpha - \frac{2}{3}\pi - \varphi\right) - \operatorname{sen}\left(\alpha - \frac{2}{3}\pi - \varphi\right) \cdot e^{-\frac{R}{X}(\omega t)} \right]$	(2.12)
$F_{m3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sqrt{3} i_{p3}^2 \frac{L}{a_m}$	(2.13)
$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \sqrt{3} \left(\frac{i_{p3}}{n_s}\right)^2 \frac{L_s}{a_s}$	(2.14)
$\frac{I_p}{I_k''} = \sqrt{2} \left[1 + e^{-\frac{R}{X}} \right] = \sqrt{2} \kappa$	(2.15)
$a_m = \frac{a}{k_{12}}$	(2.16)
$\frac{1}{a_s} = \sum_{s=1}^{n_c} \frac{k_{1s}}{a_{1s}}$	(2.17)

$\sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} L}{8Z}$	(2.18)
$\sigma_s = V_{\sigma s} V_{rs} \frac{F_s L_s}{16Z_s}$	(2.19)
$Z_{x-x} = \frac{1}{6} n_s d b^2$	(2.20)
$Z_{y-y} = \frac{1}{6} n_s b d^2$	(2.21)
$\sigma_m \leq 1.5 R_{p0.2}(\text{min})$	(2.22)
$\sigma_{\text{total}} = \sigma_m + \sigma_s$	(2.23)
$\sigma_{\text{total}} \leq 1.5 R_{p0.2}(\text{min})$	(2.24)
$\sigma_s \leq R_{p0.2}(\text{min})$	(2.25)
$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3}$	(2.26)
$f_c = \frac{\gamma}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}}$	(2.27)
$f_c = c \frac{\gamma}{L^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}}$	(2.28)
$J_{x-x} = \frac{1}{2} b Z_{x-x}$	(2.29)
$J_{y-y} = \frac{1}{2} d Z_{y-y}$	(2.30)
$f_{cs} = \frac{3.56}{L_s^2} \sqrt{m'_s}$	(2.31)
$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n}$	(2.32)
$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}}$	(2.33)
$K = S_{thr} \sqrt{T_{kr}}$	(2.34)
$S_{th} \leq \frac{K}{\sqrt{T_k}}$	(2.35)
$K = \sqrt{\frac{\kappa_{20} c p}{\alpha_{20}} \ln \frac{1 + \alpha_{20} (\theta_f - 20)}{1 + \alpha_{20} (\theta_i - 20)}}$	(2.36)

Capítulo 3

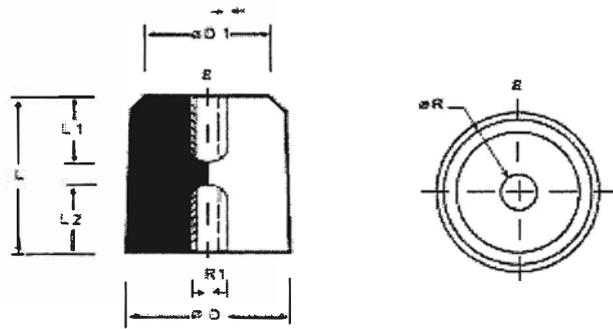
$\frac{\mu_0 \sqrt{3} V_\sigma V_r k_{12}}{32 \pi a Z} (n I_k L)^2 \leq q R_{p0.2}(\text{min})$	(3.1)
$I_k = \frac{3.4b}{nL} \sqrt{\frac{ad R_{p0.2}(\text{min})}{V_\sigma V_r \beta k_{12}(\text{c.s})}}$	(3.2)

$I_k = \frac{3.4d}{nL} \sqrt{\frac{abR_{p0.2}(\text{min})}{V_\sigma V_r \beta k_{12}(\text{c.s})}}$	(3.3)
$\frac{\mu_0 \sqrt{3} V_\sigma V_r \beta k_{12}}{32\pi a Z} (nI_k L)^2 + \frac{\mu_0 \sqrt{3} V_{\sigma s} V_{rs}}{64\pi a_s Z_s} (nI_k L_s)^2 \leq qR_{p0.2}(\text{min})$	(3.4)
$I_k = \frac{8.32}{nL} \sqrt{\frac{R_{p0.2}(\text{min})}{(\text{c.s}) \left[\frac{V_\sigma V_r \beta k_{12}}{aZ} + \frac{V_{\sigma s} V_{rs}}{2a_s Z_s (k+1)^2} \right]}}$	(3.5)
$I_k = \frac{AK}{c.sp\sqrt{T_k}}$	(3.6)

ANEXO E

Protocolos de prueba de aisladores cónicos

AISLADOR PORTABARRA USO INTERIOR



TIPO AP

TIPO	KV	KV/Fi	C/Kgf	Lf	L	D	D1	L1	L2	R	R1
AP 0.5/400	0.5	3	400	31	30	30	23	13	13	1/4"	1/4"
AP 1/750	1	5	750	41	40	40	32	16	16	3/8"	3/8"
AP 1/1000	1	5	1000	51	50	50	40	16	16	1/2"	1/2"
AP 1.5/1250	1.5	7	1250	62	60	60	50	20	20	5/8"	5/8"
AP 1.5/1300	1.5	7	1300	62	60	70	60	20	20	5/8"	5/8"



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

LABORATORIO N° 06

ELECTRICIDAD

INFORME TECNICO DE ENSAYO

1.0 DATOS

1.1 SOLICITANTE *PRODUCTOS ELECTRICOS INDUSTRIALES S.A.*

1.2 MUESTRAS : *Una Muestra de Aislador modelo Ap-0.5 /400 de 0.5 kV - 60 Hz*

Una Muestra de Aislador modelo AP-de 1/750 kV - 60 Hz.

Una Muestra de Aislador modelo AP-1/1000 de 1 kV - 60 Hz.

1.3 PRUEBAS SOLICITADAS : *Medición de la Resistencia de Aislamiento.
Prueba de Flameo en seco
Prueba de Flameo en húmedo
Prueba de Tensión de ruptura*

2.0 EJECUCION

2.1 LUGAR Y FECHA

Las pruebas se han efectuado en el Laboratorio de Electricidad No 6 de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería el día 14/01/97

2.2 PRUEBAS EFECTUADAS POR:

*Ing. Víctor Cáceres Cárdenas
- Bach. Eleodoro Agreda Vásquez*



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

LABORATORIO N° 06

ELECTRICIDAD

3.0 ESPECIFICACIONES DE REFERENCIA

Norma Técnica UNE- 21-110-83 Parte I y II

4.0 MUESTRAS ENSAYADAS

- Tres muestras de aisladores de resina epóxica modelos:
 - Muestra Ap - 0.5/400 $h = 30 \text{ mm}$
 - Muestra Ap - 1/750 $h = 40 \text{ mm}$
 - Muestra Ap - 1/1000 $h = 50 \text{ mm}$

5.0 RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 Condiciones Ambientales de Prueba

Temperatura Ambiente 25°C
Humedad Relativa 80%

5.2 Medición de la Resistencia de Aislamiento

La prueba se ha efectuado aplicando una tensión continua de 1 kV de c.c. durante un minuto, cuyos valores se muestran en el cuadro N°1

CUADRO N° 1

MUESTRA N°	TENSION DE PRUEBA kV(c.c.)	RESISTENCIA DE AISLAMIENTO R (M Ω)	TEMPERATURA AMBIENTE ($^{\circ}\text{C}$)	HUMEDAD RELATIVA (%)
01	1	15,000	25	80
02	1	17,000	25	80
03	1	18,000	25	80



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

LABORATORIO N° 06

ELECTRICIDAD

5.3 PRUEBA DE FLAMEO EN SECO

Esta prueba se ha efectuado aplicando a cada muestra una tensión alterna de frecuencia industrial de 60 Hz, cuyos valores se muestran en el cuadro N°2

CUADRO N° 2

MUESTRA N°	TENSION APLICADA kV.	TIEMPO EN MINUTOS	TEMPERATURA AMBIENTE °C	HUMEDAD RELATIVA (%)
01	5	1	25	80
02	5	1	25	80
03	5	1	25	80

5.4 PRUEBA DE FLAMEO EN HUMEDO

Esta prueba se ha efectuado aplicando a cada muestra una tensión alterna de frecuencia industrial de 60 Hz, cuyos valores se muestran en el cuadro N°3

CUADRO N° 3

MUESTRA N°	TENSION DE PRUEBA kV.	TIEMPO EN MINUTOS	TEMPERATURA AMBIENTE °C	HUMEDAD RELATIVA (%)
01	5	1	25	80
02	5	1	25	80
03	5	1	25	80



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

LABORATORIO N° 06

ELECTRICIDAD

5.5 PRUEBA DE TENSION HASTA LA RUPTURA

Esta prueba se ha efectuado aplicando a cada muestra una tensión alterna de frecuencia industrial de 60 Hz, hasta lograr la tensión de ruptura, cuyos valores se muestran en el cuadro N°4

CUADRO N° 4

MUESTRA N°	TENSION DE PRUEBA kV.	TIEMPO EN SEGUNDOS	TEMPERATUR A AMBIENTE °C	HUMEDAD RELATIVA (%)
01	22	10	25	80
02	35	20	25	80
03	42	25	25	80

5.0 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

5.1 La prueba de rigidez dieléctrica se realizó aplicando a las muestras una tensión de permanencia de 5 kV de frecuencia industrial de 60 Hz durante 1 minuto, sin obtenerse descargas superficiales ni perforación de las muestras.

5.2 Luego se incrementó la tensión a las muestras hasta la tensión de ruptura, lográndose obtener la ruptura en 22 kV 10 segundos en la muestra N°1, 35 kV 20 segundos en la muestra N°2 y 42 kV 25 segundos en la muestra N°3



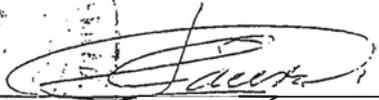
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

LABORATORIO N° 06

ELECTRICIDAD

5.3 De las pruebas realizadas y los resultados obtenidos que es materia de este Informe se concluye que las muestras N°1,0 N°2, y N°3 satisfacen los valores exigidos por las Norma utilizada como referencia de prueba a 1000 Voltios


MSc. ING. VÍCTOR CÁCERES CÁRDENAS
Jefe de Lab. de Electricidad N°6

Lima, 15 de Enero de 1997

Lab N°6/Malena



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA, ENSAYOS MECÁNICOS Y METROLOGÍA
LABORATORIO N° 4

INFORME TECNICO DE ENSAYO A FLEXION EN AISLADORES DE APOYO TIPO TRONCO-CONICO

SOLICITANTE : PRODUCTOS ELECTRICOS INDUSTRIALES S.A.
REFERENCIA : Orden de Laboratorio N° 90835
FECHA : Lima, 14 de Enero de 1997
INFORME N° : L4-012-97

1. ANTECEDENTE: Se recepcionó tres (03) muestras de aisladores para efectuarles ensayo a flexión.

2. DE LOS

AISLADORES:

Identificación	: Aisladores de apoyo
Tipo	: Tronco-cónico
Material	: Recinas
N° de Muestras	: Tres (03)
Muestra 1	: AP-0,5/400 - Altura 30 mm
Muestra 2	: AP-1/750 - Altura 40 mm
Muestra 3	: AP-1/1000 - Altura 50 mm

3. PROCEDIMIENTO

DE ENSAYO : Norma Técnica Española:
UNE 21-110-90
"AISLADORES DE APOYO PARA INTERIORES Y
EXTERIORES DE MATERIAL CERÁMICA O VIDRIO
DESTINADO A INSTALACIONES DE TENSION NOMINAL
SUPERIOR A 100 V".

4. EQUIPO

UTILIZADO: - Máquina de tracción UNIVERSAL marca AMSLER con capacidad de 5,000 Kg.

5. CONDICION DE

ENSAYO: Medio ambiente.



ANEXO

I. RESULTADO DE ENSAYO

MUESTRA	DISTANCIA DE FLEXION (mm)	CARGA MAXIMA A LA FLEXION		OBSERVACIONES
		(Kg)	N	
1-AP-0.5/400	30	500	4 903.3	FRACTURO EL AISLADOR
2-AP-1/750	40	1080	10 591.1	FRACTURO EL AISLADOR
3-AP-1/1000	50	1050	10 296.9	FRACTURO EL AISLADOR



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA, ENSAYOS MECANICOS Y METROLOGIA

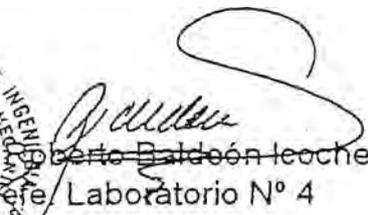
LABORATORIO N° 4

Informe N° L4-012-97 (Pág. 2)

6.RESULTADO

DE ENSAYOS: Ver hoja de ANEXO.

Atentamente,


JEFATURA: 
Roberto Baldoón Lechea
Jefe Laboratorio N° 4

Edith



INFORME TECNICO DE PRUEBAS ELECTRICAS DE
AISLADORES DE RESINA EPOXICA ARALDIT PARA PRODUCTOS
ELECTRICOS INDUSTRIALES S.A. (PREISA)

1.0 DATOS :

- 1.1 SOLICITANTE PRODUCTOS ELECTRICOS INDUSTRIALES S. A (PREISA).
- 1.2 LUGARES DE PLANTA Electric Power Av. Velazco Alvarado # 683 - Los Jardines Santa Anita.
- 1.3 MEDICIONES SOLICITADAS: - Medición de la Resistencia de aislamiento
- Prueba de Flameo en Seco
- Prueba de Flameo en Húmedo
- 1.4 EQUIPO UTILIZADO
- Una fuente de 0 - 80 kV- 60 Hz
 - Higrómetro de 0 - 100% de humedad relativa
 - Medidor de temperatura ambiente de 0-50 °C
 - Un Megohmetro digital. Megger.

2.0 EJECUCION:

2.1 LUGAR :

Las Mediciones se han realizado en las Instalaciones del Laboratorio de la Empresa de Electric Power, el día 24 de Setiembre de 1998

2.2 MEDICIONES EFECUADAS POR :

- MSc. Ing. Víctor Cáceres Cárdenas
- Bach. Eleodoro Agreda Vásquez
- Téc. Oscar Almeyda Ramos



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

INSTITUTO DE INVESTIGACION

3.0 ESPECIFICACIONES DE REFERENCIA

Norma Técnica UNE - 21-110-83 parte I y II.

4.0 RESULTADOS OBTENIDOS :

Muestras Ensayadas

Dos muestras de aisladores de resina epóxica ARALDIT modelo Ap-17.5/400 , color marrón

4.1 Medición de la Resistencia de Aislamiento

La prueba se ha efectuado aplicando una tensión de corriente continua de 1,0 kV durante 1 minuto, cuyos valores se muestran en el cuadro N° 1

CUADRO N° 1

MUESTRA	RESISTENCIA DE AISLAMIENTO (M Ω)	TENSION DE PRUEBA EN (kV)	Temperatura Ambiente (°C)	Humedad Relativa (%)	Observaciones
01	18,000	1	20	80	Satisface
02	19,000	1	20	80	Satisface

4.2 PRUEBA DE FLAMEO EN SECO

Esta prueba se ha efectuado aplicando a cada muestra tensión de corriente alterna de frecuencia industrial de 60 Hz, cuyos a una velocidad de 2 kV/segundos cuyos valores se encuentran en el cuadro N°2

CUADRO N° 2

MUESTRA	TENSION APLICADA EN (kV) Promedio	TIEMPO EN MINUTOS	Temperatura Ambiente (°C)	Humedad Relativa (%)	Observaciones
01	40	1	20	80	Satisface
02	40	1	20	80	Satisface



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

INSTITUTO DE INVESTIGACION

4.3 PRUEBA DE FLAMEO EN HUMEDO

Esta prueba se ha efectuado aplicando a cada muestra una tensión alterna de frecuencia industrial de 60 Hz, a una velocidad de 2 kV/segundo cuyo valor promedio se muestra en el cuadro N°3

CUADRO N° 3

MUESTRA	TENSION APLICADA EN kV Promedio	TIEMPO EN MINUTOS	Temperatura Ambiente (°C)	Humedad Relativa (%)	Observaciones
01	38	1	20	80	Satisface
02	38	1	20	80	Satisface

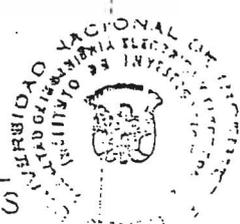
4.0 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES :

4.1 Las muestras de aisladores de resina epóxica ARALDIT modelo AP-7.5/400 se ha probado hasta 50 kV-60 Hz sin producirse descargas superficiales, y sin perforarse la muestra, deben ser utilizado estos aisladores hasta 25 kV - 60 Hz..

4.2 De las pruebas efectuadas y los resultados obtenidos que es materia de este Informe, se concluye que las muestras 1 y 2 satisfacen los valores exigidos por la Norma utilizada como referencia.

BACH. ELEODORO AGREDA VASQUEZ
Especialista

V°B° MSc. ING. VICTOR CACERES CARDENAS
Director de Instituto de Investigación
FIEE - UNI





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

LABORATORIO N° 06

ELECTRICIDAD

INFORME TÉCNICO DE METROLOGIA DEL AISLADOR, TIPO SOPORTE DE BARRAS DE 02 VÍAS DE RESINA EPÓXICA

INFORME TEC. N° LABUNI - 123/2004

1.- CONCESIONARIO

PREISA PRODUCTOR ELÉCTRICOS INDUSTRIALES S. A.

2.- MUESTRAS ENVIADAS

01 muestras de Aisladores. Tipo soportador de barras de 02 vías de Resina Epóxica de propiedad de la empresa PREISA Productos Eléctricos Industriales S. A.

3.- PRUEBAS SOLICITADAS:

- Prueba de Aislamiento A 2.5 kV. c.c.
- Prueba de Rigidez Dieléctrica
- Pruebas Mecánicas: Carga de Rotura

4.- EJECUCIÓN

Las pruebas se han efectuado en el Laboratorio de Electricidad N° 6 de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería el día 17 de diciembre del 2004.

- Las pruebas han sido realizadas por el personal Técnico Calificado de la FIEE - UNI:
Ing° Mario G. Rodríguez Macedo
Eleodoro Agreda Vásquez

5.- EQUIPOS UTILIZADOS

- Fuente de Alta Tensión en Corriente Continua
- Fuente de Alta Tensión en Corriente Alterna a 60 Hz

6. NORMAS TECNICAS DE REFERENCIA

- UNE 21- 100
- Norma Técnica IEC - 383 - 83
- Norma Técnica ANSI C 29.1 - 88, C 92.2 88
- Norma Técnica ANSI UNE - 21 - 308 - 76 - I
- Norma Técnica ANSI UNE - 21 - 308 - 76 - II



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

LABORATORIO N° 06

ELECTRICIDAD

7.- RESULTADOS OBTENIDOS:

7.1. PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO A 2.5 kV. c.c.

Se llevo a cabo aumentando la Tensión en Corriente Continua hasta los valores indicados en el cuadro. N° 01.

CUADRO N° 01

Aislador tipo soportador de barras	Tensión (kV)	Tiempo (minutos)	Resistencia de Aislamiento (MΩ)
De 02 vías	2.5	1.0	970

7.2. PRUEBA DE RIGIDEZ DIELECTRICA

Las pruebas se han realizado a condiciones ambiente de 20 °C y 72% de humedad relativa, cuyos valores se muestran en el cuadro N° 02.

CUADRO N° 02

Aislador tipo soportador de barras	Flameo en Seco		Flameo en Húmedo	
	Tensión (kV)	Tiempo (minutos)	Tensión (kV)	Tiempo (minutos)
De 02 vías	20	1.0	15	1.0

7.3. PRUEBAS MECÁNICAS: CARGA DE ROTURA

Este ensayo del Aislador, tipo soportador de barras, se realizó en el Laboratorio N° 04 de Ensayos de Materiales, cuyos valores se muestran en el cuadro N° 03.

CUADRO N° 03

Aislador tipo soportador de barras	Temperatura Ambiente (° C)	Humedad Relativa (%)	Carga de Rotura (kG)
De 02 vías	20	72	1,300

8.- OBSERVACIONES

- Los valores registrados en los cuadros N° 01, N° 02 y N° 03, corresponden al Aislador, tipo soportador de barras de 1.5 kV/130 Kg.

9.- CONCLUSIONES

- Los valores obtenidos en los cuadros N° 01, N° 02 y N° 03 corresponden al Aislador, tipo soportador de barras de resina expóxica, el cual cumplen con lo establecido en la Norma Técnica UNE 21- 100

Lima, 17 de Diciembre de 2014



ELEODORO AGREDA VASQUEZ
ADMINISTRACIÓN

BIBLIOGRAFÍA

1. IEC 60909, "Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents", International Electrotechnical Commission - Europa, 2001.
2. J. C. Das, "Power System Analysis, Short-Circuit Load Flow and Harmonics", Marcel Dekker Inc. - Estados Unidos, 2002.
3. EDSA, "Short Circuit Analysis Program ANSI/IEC/IEEE: User's Guide", EDSA Micro Corporation - Estados Unidos, 2006.
4. Günter G. Seip, "Instalaciones Eléctricas – Tomo I", Siemens - Alemania, 1989.
5. IEC 60865, "Short-circuit Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods", International Electrotechnical Commission - Europa, 1993.
6. DIN-EN 61660 (VDE 0103), "Kurzschlußströme in Gleichstrom-Eigenbedarfsanlagen von Kraftwerken und Schaltanlagen – Partie 2", Deutsches Institut für Normung und Verband Deutscher Elektrotechniker - Alemania, 1997.
7. IEC 60439, "LV Switchgear and Controlgear Assemblies – Part 1: Type-tested and partially type-tested Assemblies", International Electrotechnical Commission - Europa, 2004.
8. ABB, "ABB Switchgear Manual", Asea Brown Boveri - Suiza, 2004.
9. Ronald A. Walsh, "Electromechanical Design Handbook", McGraw-Hill - Estados Unidos, 2000.
10. Siemens, "Manual de baja tensión", Publicis MCD Verlag - Alemania, 2000.
11. IEC 60947, "Low voltage switchgear and controlgear – Part 2: Circuit Breakers", International Electrotechnical Commission - Europa, 2003.
12. NEC 2008, "National Electrical Code", National Fire Protection Association - Estados Unidos, 2008.
13. Donald G. Fink & H. Wayne Beaty, "Standard Handbook Electrical Engineering", McGraw-Hill - Estados Unidos, 2006.
14. Christophe Prévê, "Protection of Electrical Networks", ISTE Ltd. - Gran Bretaña, 2006.
15. Schneider, "Cuaderno Técnico Nº 83" - Francia, 1997.