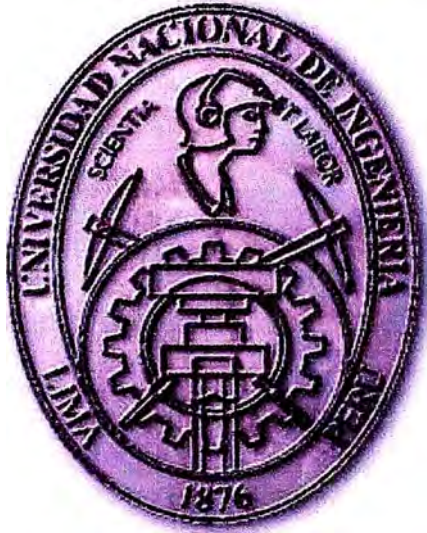


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**DISEÑO ÓPTIMO DE BARRAS DE DISTRIBUCIÓN PARA
SUBESTACIONES DE MEDIA TENSIÓN**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

MARCO ANTONIO MORENO REINOSO

**PROMOCIÓN
2004 - I**

**LIMA – PERÚ
2009**

**DISEÑO ÓPTIMO DE BARRAS DE DISTRIBUCIÓN PARA
SUBESTACIONES DE MEDIA TENSIÓN**

*Dedicado a
Bertha Cristina Reinoso Basualdo,
Ejemplo de Amor.*

SUMARIO

El presente informe esta desarrollado a solicitud de implementar métodos técnico – económicos para el cálculo y selección de barras colectoras. Además, esta orientado al desarrollo y el sustento del cálculo matemático para la obtención de su tamaño y montaje.

El diseño óptimo se obtendrá al cumplir con las exigencias técnicas y económicas propias del diseño de barras colectoras.

INDICE

PROLOGO

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1	Objetivo	02
1.2	Introducción	02
1.3	Alcances	02

CAPÍTULO II

CÁLCULO DE ESFUERZOS MECÁNICOS

2.1	Cálculo por Corriente Nominal	03
2.2	Cálculo por Corrientes Armónicas	13
2.3	Cálculo por Esfuerzos Electrodinámicos	15
2.3.1	Transitorios en un Circuito R-L	15
2.3.2	Esfuerzos Electrodinámicos en Barras	18
2.3.3	Cálculo Mecánico de las Barras	21
2.4	Cálculo por Efectos Térmicos	24
2.4.1	Efectos Térmicos producidos por Corriente Nominal	24
2.4.2	Efectos Térmicos producidos por Corriente de Cortocircuito	25
2.5	Resonancia	26
2.6	Cálculo de Aisladores	27

CAPÍTULO III

PÉRDIDA DE CALOR EN BARRAS RÍGIDAS

3.1	Disipación de Calor por Convección	28
3.1.1	Incremento de la temperatura debido a los Armónicos	29
3.2	Disipación de Calor por Radiación	29

3.3	Pérdidas por Efecto Joule	30
3.3.1	Incremento de Pérdidas por efecto Joule debido a los Armónicos	31

CAPÍTULO IV

CÁLCULO ECONÓMICO DE BARRAS RÍGIDAS

4.1	Cálculo del Tamaño Mínimo	32
4.2	Cálculo del Tamaño Mínimo Económico	32
4.2.1	Costo de Inversión	32
4.2.2	Costo de las Pérdidas	33
4.2.3	Costo Combinado de Inversión y el gasto de Energía	34

CAPÍTULO V

APLICACIÓN EN UNA SUBESTACION DE 20MVA EN 22.9 kV.

5.1	Cálculo de Barras Rígidas-Modelo Tradicional	37
5.1.1	Calculo por corriente nominal	37
5.1.2	Cálculo por esfuerzos electrodinámicos	38
5.1.3	Cálculo por esfuerzos térmicos	40
5.1.4	Cálculo por Resonancia	40
5.1.5	Calculo de aisladores	41
5.2	Cálculo de Barras Rígidas-Modelo Económico	41
5.2.1	Cálculo del tamaño mínimo de barra	41
5.2.2	Cálculo del tamaño mínimo económico	43

CONCLUSIONES

ANEXO

BIBLIOGRAFÍA

PROLOGO

En el presente informe se realizará el diseño de barras rígidas de una subestación tipo interior considerando los siguientes modelos de cálculo: el modelo tradicional y el modelo económico.

En el modelo tradicional se desarrolla el cálculo de la corriente nominal, esfuerzos electrodinámicos, esfuerzos térmicos, el cálculo de resonancia y de aisladores; y en el modelo económico se desarrolla el cálculo del tamaño mínimo y el tamaño mínimo económico de las barras.

El cálculo desarrollado será para aquella subestación interior en donde se utilice barras rígidas rectangulares; no obstante, la metodología utilizada servirá para el diseño de barras circulares y rectangulares de instalación exterior.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo

Realizar el diseño óptimo de barras colectoras de una subestación de distribución interior.

1.2 Introducción

Actualmente, las barras colectoras son seleccionadas a través del cálculo de esfuerzos electrodinámicos con los siguientes objetivos: soportar los máximos esfuerzos que se presentan ante un corto circuito y cumplir con las condiciones mínimas de seguridad; sin embargo, en condiciones de operación normal, las pérdidas de energía que se producirán debido al efecto Joule, no han sido evaluadas.

Esta situación es resuelta mediante el cálculo del tamaño mínimo económico de las barras colectoras, en donde se relacionan las pérdidas por efecto Joule y el costo de la energía.

Con el uso conjunto de ambos métodos realizaremos un cálculo técnico-económico que nos dará como resultado el diseño óptimo.

1.3 Alcances.

La selección óptima de las barras colectoras se obtiene con el desarrollo de los siguientes capítulos: Capítulo 2, en donde se realiza el cálculo de la capacidad de corriente, esfuerzos electrodinámicos, esfuerzos térmicos y el cálculo de aisladores; Capítulo 3, en el cual se realiza el cálculo de la disipación de calor por Convección, Radiación y efecto Joule; y el Capítulo 4 en donde se desarrolla el cálculo del tamaño mínimo, el tamaño mínimo económico, el costo de inversión y el costo de las pérdidas de energía.

Finalmente, en el Capítulo 5, desarrollaremos como ejemplo de aplicación el cálculo de las barras colectoras para una subestación de distribución de 20MVA de potencia y 22.9 kV de tensión.

En el ejemplo desarrollado los costos de las barras de cobre y de la energía serán referenciales. Estas aproximaciones nos servirán para mostrar la relación existente entre el costo de la energía y la variación de la sección de la barra.

CAPÍTULO II

CÁLCULO DE ESFUERZOS MECÁNICOS

Las barras colectoras rígidas en instalación interior o exterior, son diseñadas considerando los siguientes factores electromecánicos:

- Corriente Nominal.
- Corrientes Armónicas.
- Esfuerzos Electrodinámicos.
- Efectos Térmicos.
- Resonancia.
- Cálculo de Aisladores.

2.1 Cálculo por Corriente Nominal

Las barras colectoras deben de ser capaces de transportar permanentemente la corriente requerida (corriente nominal). Esta corriente se obtiene del valor de la potencia solicitada:

$$I_n = \frac{KVA \times F_k}{\sqrt{3} \times kV} \quad (2.1)$$

en donde:

- I_n = Corriente nominal (A);
- KVA = Potencia aparente;
- F_k = Factor de seguridad;
- kV = Tensión nominal.

El factor de seguridad (F_k) de la ecuación 2.1 nos garantiza una reserva para prever un aumento en la solicitud de potencia de la subestación.

La norma DIN 43671 “STROMSCHIENEN AUS KUPFER — BEMESSUNG FÜR DAUERSTROM” (“Barras Colectora de Cobre - Diseño según la Corriente Permanente”) proporciona tablas de capacidad de transporte de corriente en una barra rígida bajo determinadas condiciones de instalación. Los valores indicados en estas tablas son

validas para barras rodeadas por aire, que no sean enfriadas artificialmente y con la superficie más larga (ancho) en disposición vertical u horizontal (solo en caso de un platina por fase) para el caso de platinas rectangulares.

La confección de las tablas se basa en las siguientes hipótesis:

a) Para instalaciones interiores:

- El aire ambiente inmóvil.
- Barras desnudas parcialmente oxidadas (situación de trabajo que se alcanza más tarde o más temprano en un envejecimiento natural dependiendo de las condiciones ambientales), con lo cual el grado de emisión es 0,4 (ver capítulo 3).

Barras pintadas (solo las exteriores, en caso de barras múltiples); el grado de emisión es aproximadamente 0,9.

b) Para las instalaciones exteriores:

Cierto movimiento de aire de 0.6 m/s; debido a movimientos de aire caliente alrededor de las barras.

Barras desnudas oxidadas normalmente; de tal manera que el grado de emisión es 0,6 y la radiación solar (energía emitida por el sol en forma de radiación) puede ascender a 0,45 kW/m².

Barras pintadas; obteniéndose un grado de emisión de aproximadamente 0,9 y la radiación solar puede ascender a 0,7 kW/m².

Para instalaciones exteriores, estos valores corresponden a situaciones de Europa central [2].

Con estas hipótesis se obtienen las tablas N° 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 en las que se indican la capacidad de corriente de barras tendidas en forma horizontal (o vertical), a una temperatura ambiente de 35 °C y una temperatura interior de 65 °C.

CONSIDERACIONES:

Con respecto a las temperaturas se establece que el valor medio máximo dentro de 24 horas de operación debe de ser 35 °C; pudiendo alcanzar 40 °C por periodos cortos de tiempo.

La corriente alterna señalada en las tablas N° 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 es válida tanto para un sistema monofásico como para un sistema trifásico. Una eventual influencia de

calentamiento mutuo (a consecuencia del emplazamiento relativo de las fases) no es tomada en cuenta.

- Para instalaciones interiores abiertas con aire ambiente tranquilo podemos multiplicar de 1 a 1,05 los valores que aparecen en las tablas, debido a que suelen producirse pequeños movimientos de aire por convección ajenos a las barras (por ejemplo: el flujo de aire caliente disipado por un transformador de potencia).
- Para instalaciones interiores encapsuladas sin ventilación forzada se puede multiplicar por 0,8 a 1,1 los valores que aparecen en las Tablas Nº 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 según el sentido de la corriente y la radiación de las barras inmediatas.
- En la Tabla Nº 2.1 se considera la temperatura ambiente a 35°C y la temperatura de barra 65°C. Barras en posición vertical y distancia entre barras igual al espesor de la barra. En corriente alterna y barras múltiples el espacio entre fases $> 0,8 \times$ distancia entre ejes de las barras. El peso de las barras es calculado para una densidad de 8,9kg/dm³ (1). Para cuatro barras la distancia mínima de separación es igual a 50mm (2), el material E-Cu (cobre electrolítico) u otros materiales según DIN 40500 (3) y una barra plana con redondeo de aristas según DIN 46433. En la tabla Nº 2.2 las barras parciales están sin separación.
- En la tabla Nº 2.3 se considera la temperatura ambiente igual a 35°C y la temperatura de barra 65°C. En corriente alterna la distancia entre ejes de los conductores principales (fases) ≥ 2 diámetro. El peso de las barras es calculado para una densidad de 8,9kg/dm³ (1), el material E-Cu u otros materiales según DIN 40500 (2). Material semielaborado preferible a ser usado, redondos según DIN 1756.
- Para la tabla Nº 2.4 se considera la temperatura ambiente 35°C y la temperatura de barra 65 °C. En corriente alterna la distancia entre ejes de los conductores principales (fases) $\geq 2,5$ diámetro exterior. El peso de la barra es calculado para una densidad de 8,9kg/dm³ (1), el material E-Cu u otros materiales según DIN 40500 (2). El material semielaborado preferible a ser usado, tubo según DIN 1754.

En caso de encontrar divergencias con las hipótesis anteriores se debe multiplicar a los valores que aparecen en las tablas por los siguientes factores de corrección:

- a) Factor de corrección K1: factor de corrección para variaciones de la capacidad de carga relativas a la conductividad. Si el material que se está utilizando tiene una conductividad eléctrica diferente a 56 m/Ω.mm², seleccionar el factor k1 según lo indique la figura 2.1.

Tabla N° 2.1: Capacidad de conductores de cobre de sección rectangular en instalación interior.

Ancho x Espesor	Sección	Peso (1)	Material (3)	CORRIENTE PERMANENTE EN A															
				CORRIENTE ALTERNA HASTA 60Hz								CORRIENTE CONTINUA Y CORRIENTE ALTERNA HASTA 16 ² / ₃ Hz							
				Pintado				Desnudo				Pintado				Desnudo			
				Número de barras				Número de barras				Número de barras				Número de barras			
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
mm	mm ²	kg/m		I	II	III	II ⁵⁰ II (2)	I	II	III	II ⁵⁰ II (2)	I	II	III	IIII	I	II	III	IIII
12x2	23.5	0.209	E-Cu F30	123	202	228		108	182	216		123	202	233		108	182	220	
15x2	29.5	0.263		148	240	261		128	212	247		148	240	267		128	212	252	
15x3	44.5	0.396		187	316	381		162	282	361		187	316	387		162	282	365	
20x2	39.5	0.352		189	302	313		162	264	298		189	302	321		162	266	303	
20x3	59.5	0.530		237	394	454		204	348	431		237	394	463		204	348	437	
20x5	99.1	0.88		319	560	728		274	500	690		320	562	729		274	502	687	
20x10	199	1.77		497	924	1320		427	825	1180		499	932	1300		428	832	1210	
25x3	74.5	0.66		287	470	525		245	412	498		287	470	536		245	414	506	
25x5	124	1.10		384	662	839		327	586	795		384	664	841		327	590	794	
30x3	89.5	0.80		337	544	593		285	476	564		337	546	608		286	478	575	
30x5	149	1.33		447	760	944		379	672	896		448	766	950		380	676	897	
30x10	299	2.66		676	1200	1670		573	1060	1480		683	1230	1630		579	1080	1520	
40x3	119	1.06		435	692	725		366	600	690		436	696	748		367	604	708	
40x5	199	1.77		573	952	1140		482	836	1090		576	966	1160		484	848	1100	
40x10	399	3.55		850	1470	2000	2580	715	1290	1770	2280	865	1530	2000		728	1350	1880	
50x5	249	2.22		697	1140	1330	2010	583	994	1260	1920	703	1170	1370		588	1020	1300	
50x10	499	4.44		1028	1720	2320	2950	852	1510	2040	2600	1050	1830	2360		875	1610	2220	
60x5	299	2.66		826	1330	1510	2310	688	1150	1440	2210	836	1370	1580	2060	696	1190	1500	1970
60x10	599	5.33		1180	1960	2610	3290	985	1720	2300	2900	1230	2130	2720	3580	1020	1870	2570	3390
80x5	399	3.55		1070	1680	1830	2830	885	1450	1750	2720	1090	1770	1990	2570	902	1530	1890	2460
80x10	799	7.11		1500	2410	3170	3930	1240	2110	2790	3450	1590	2730	3420	4490	1310	2380	3240	4280
100x5	499	4.44		1300	2010	2150	3300	1080	1730	2050	3190	1340	2160	2380	3080	1110	1810	2270	2960
100x10	999	8.89		1810	2850	3720	4530	1490	2480	3260	3980	1940	3310	4100	5310	1600	2890	3900	5150
120x10	1200	10.68		2110	3280	4270	5130	1740	2860	3740	4500	2300	3900	4780	6260	1890	3390	4560	6010
160x10	1600	14.24		2700	4130	5360	6320	2220	3590	4680	5530	3010	5060	6130	8010	2470	4400	5860	7710
200x10	2000	17.80		3290	4970	6430	7490	2690	4310	5610	6540	3720	6220	7460	9730	3040	5390	7150	9390

Fuente: Norma DIN 43671

Tabla N° 2.2: Capacidad de conductores de cobre de sección rectangular en instalación interior en corriente continua.

ANCHO X ESPESOR mm	SECCIÓN mm ²	PESO (1) kg/m	MATERIAL (2)	SUPERFICIE	INTENSIDAD PERMANENTE EN A CTE. CONTINUA - NUMERO DE BARRAS										
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
80 x 10	799	7.11	E-Cu F30	PINTADO	1590	2360									
				DESNUDO	1810	1960									
100 x 10	999	8.89		PINTADO	1940	2870	3660	4390	5080	5740	6390	7030	7660	8290	
				DESNUDO	1600	2370	3020	3620	4190	4740	5270	5800	6320	6840	
120 x 10	1200	10.7		PINTADO	2300	3380									
				DESNUDO	1890	2780									
200 x 10	2000	17.8		PINTADO	3720	5390	5750	7960	9080	10200	11200	12200	13100	14100	
				DESNUDO	3040	4400	5510	6500	7420	8290	9120	9930	10700	11500	

Fuente: Norma DIN 43671

Tabla N° 2.3: Conductores de cobre de sección circular en instalaciones interiores.

DIAMETRO mm	SECCIÓN mm ²	PESO (1) kg/m	MATERIAL (2)	INTENSIDAD PERMANENTE EN A CC, CA HASTA 60Hz		VALORES ESTATICOS		
				PINTADO	DESNUDO	J cm ⁴	W cm ³	l cm
5	19.6	0.175	E-Cu F37	95	85	0.00306	0.0123	0.125
8	50.3	0.447		179	159	0.0201	0.0503	0.200
10	78.5	0.699		243	213	0.0491	0.0982	0.250
16	201	1.79	E-Cu F30	464	401	0.322	0.402	0.400
20	314	2.80		629	539	0.785	0.785	0.500
32	804	7.16		1160	976	5.150	3.22	0.800
50	1960	17.50		1930	1610	30.7	12.3	1.250

Fuente: Norma DIN 43671

Tabla N° 2.4: Conductores de cobre de sección circular en instalaciones interiores.

ESPESOR mm	SECCIÓN mm ²	PESO (1) kg/m	MATERIAL (2)	INTENSIDAD PERMANENTE EN A CC, CA HASTA 60Hz				VALORES ESTATICOS		
				INTERIOR		EXTERIOR		J cm ⁴	W cm ³	l cm
				PINTADO	DESNUDO	PINTADO	DESNUDO			
2	113	1.01	E-Cu F37	348	329	460	449	0.464	0.464	0.640
3	160	1.43		457	392	548	535	0.597	0.597	0.610
4	201	1.79	E-Cu F30	512	438	613	599	0.684	0.648	0.583
5	236	2.10		554	475	664	648	0.736	0.736	0.559
6	264	2.35	E-Cu F25	591	506	708	691	0.765	0.765	0.539
2	188	1.68	E-Cu F37	602	508	679	660	2.13	1.33	1.06
3	273	2.44		725	611	818	794	2.90	1.82	1.03
4	352	3.14	E-Cu F30	821	693	927	900	3.52	2.20	1.00
5	424	3.78		900	760	1020	987	4.00	2.50	0.97
6	490	4.37	E-Cu F25	973	821	1100	1070	4.36	2.73	0.94
2	239	2.13	E-Cu F37	744	624	816	790	4.32	2.16	1.35
3	349	3.11		899	753	986	955	6.01	3.00	1.31
4	452	4.04	E-Cu F30	1020	857	1120	1090	7.42	3.71	1.28
5	550	4.90		1130	944	1240	1200	8.59	4.30	1.25
6	641	5.72	E-Cu F25	1220	1020	1340	1300	9.56	4.78	1.22
3	443	3.95	E-Cu F37	1120	928	1190	1150	12.3	4.91	1.67
4	578	5.16		1270	1060	1360	1310	15.4	6.16	1.63
5	707	6.31	E-Cu F30	1410	1170	1500	1450	18.1	7.25	1.60
6	829	7.40		1530	1270	1630	1570	20.4	8.18	1.57
8	1060	9.42	E-Cu F25	1700	1420	1820	1750	24.1	9.65	1.51
10	1260	11.20		1840	1530	1960	1890	26.7	10.70	1.46
3	565	5.04	E-Cu F30	1390	1150	1440	1390	25.5	8.10	2.12
4	741	6.61		1590	1320	1650	1590	32.4	10.30	2.09
5	911	8.13	E-Cu F25	1760	1460	1820	1750	38.6	12.30	2.06
6	1070	9.58		1920	1590	1990	1910	44.1	14.00	2.03
8	1380	12.30	2150	1780	2230	2140	53.4	16.90	1.97	
3	726	6.47	E-Cu F30	1750	1440	1760	1690	53.9	13.50	2.72
4	955	8.52		2010	1650	2020	1930	69.1	17.30	2.69
5	1180	10.50	E-Cu F25	2230	1820	2230	2140	83.2	20.80	2.68
6	1400	12.40		2430	1990	2440	2340	96.1	24.00	2.62
8	1810	16.10	E-Cu F25	2730	2240	2740	2630	119	29.70	2.56
10	2200	19.60		2980	2440	2990	2860	137	34.40	2.50
3	914	8.15	E-Cu F30	2170	1770	2120	2020	108	21.50	3.43
4	1210	10.80		2490	2030	2430	2320	139	27.80	3.40
5	1490	13.30	E-Cu F25	2760	2250	2700	2580	169	33.80	3.36
6	1770	15.80		3020	2460	2950	2820	196	39.30	3.33
8	2310	20.60	3410	2780	3330	3180	246	49.30	3.26	
4	1460	13.00	E-Cu F30	2970	2400	2830	2690	245	40.90	4.10
5	1810	16.10		3300	2670	3150	2990	299	49.90	4.07
6	2150	19.20	E-Cu F25	3610	2930	3440	3280	350	58.30	4.04
8	2820	25.10		4070	3300	3890	3700	444	73.90	3.97
10	3460	30.80	4400	3560	4190	3990	527	87.80	3.91	
4	1960	17.50	E-Cu F30	3910	3150	3660	3470	597	74.60	5.52
5	2440	21.70		4350	3500	4070	3860	732	91.50	5.48
6	2900	25.90	E-Cu F25	4770	3840	4460	4230	862	108	5.45
8	3820	34.10		5400	4340	5050	4790	1110	138	5.38
10	4710	42.00	5830	4690	5460	5170	1330	166	5.32	
5	3060	27.30	E-Cu F25	5440	4350	5010	4740	1460	146	6.90
6	3660	32.60		5920	4730	5460	5160	1720	172	6.88
8	4830	43.00	E-Cu F20	6700	5360	6180	5840	2230	223	6.79
10	5970	53.20		7250	5800	6690	5320	2700	270	6.73
12	7090	63.20	7610	6080	7020	6640	3140	314	6.66	
5	3850	34.30	E-Cu F25	6740	5360	6130	5780	2890	231	8.55
6	4600	41.00		7350	5830	6680	6290	3420	274	8.63
8	6080	54.30	E-Cu F20	8330	6610	7570	7130	4460	357	8.56
10	7640	67.30		9010	7160	8190	7720	5440	435	8.49
12	8970	80.00	9470	7520	8600	8110	6370	510	8.43	

Fuente: Norma DIN 43671

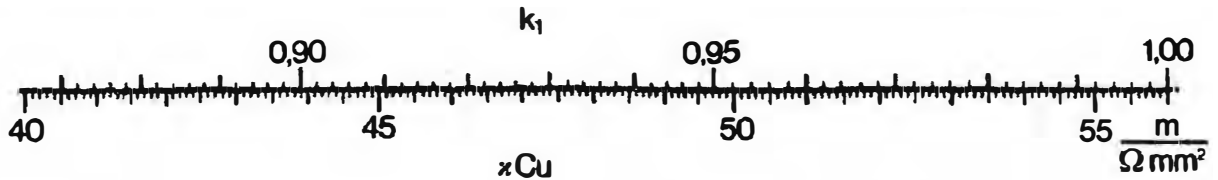


Fig. 2.1: Factor k_1 para barras de cobre de una conductividad diferente a $56 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$. Fuente: [2]

b) Factor de corrección K_2 : factor de corrección para variación de la capacidad de las barras a diferentes temperaturas de aire y/o interior de barra. Si se tiene una temperatura ambiente diferente a 35°C y/o una temperatura en barras diferente a 65°C seleccionar el factor k_2 de la figura 2.2.

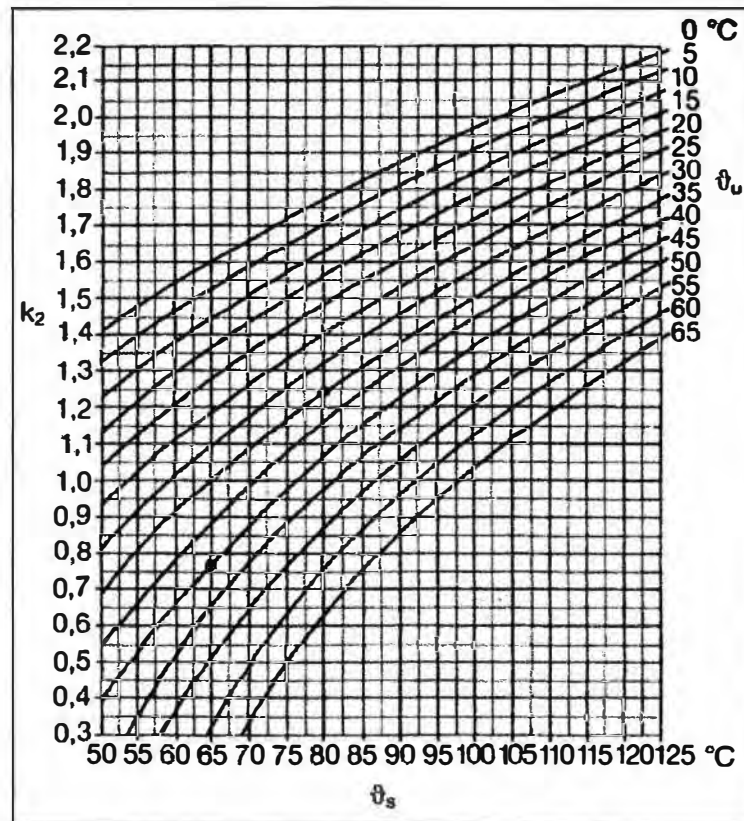





Fig. 2.2: Factor k_2 para una temperatura ambiente diferente a 35°C (ϑ_u) y/o temperatura en barras diferente a 65°C (ϑ_s). Fuente: [2]

c) Factor de corrección K_3 : factor de corrección para variación de capacidad de cargas termales debido a diferencias en la disposición. Si la superficie más larga de las barras (ancho), esta en posición horizontal o por tendido vertical por más de 2m, seleccionar el factor k_3 según lo indique la Tabla N° 2.5.

Tabla N° 2.5: Factor K3.

NÚMERO DE BARRAS	ANCHO DE LAS BARRAS (mm)	FACTOR K3 DE LAS BARRAS	
		PINTADO	DESNUDO
2 	50 a 200	0.85	0.8
3 	50 a 80	0.85	0.8
	100 a 120	0.8	0.75
4 	180	0.75	0.7
	200	0.7	0.65

Fuente: [2]

d) Factor de corrección K4: factor de corrección para variaciones de la capacidad de carga eléctrica (en corriente alterna) debido al adicional efecto Skin (tendencia de la corriente de acumularse en la capa externa del conductor debido a la autoinducción del mismo [6]) en barras de cobre con distancia "a" entre fases pequeña.

El factor K4 necesita ser considerado sólo si no hay ninguna derivación dentro de una distancia de al menos 2m. (Ver figuras 2.3, 2.4, 2.5, 2.6).

Ejemplos:

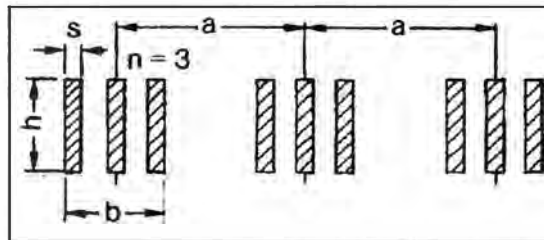


Fig. 2.3: Arreglo trifásico con $n=3$ barras/fase y espesor de las barras S en dirección de la distancia entre barras principales (fases) "a". Fuente: [2]

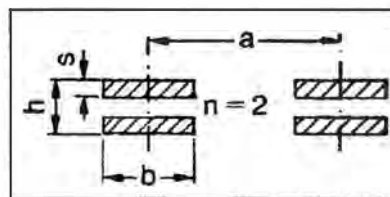


Fig. 2.4: Arreglo de corriente alterna con $n=2$ barras/fase y espesor de las barras S perpendicular a la distancia entre barras principales (fases) "a". Fuente: [2]

e) Factor de corrección K5: factor de corrección para reducción de la capacidad de carga en altitudes sobre los 1000 m sobre el nivel del mar. (Ver Tabla N° 2.6)

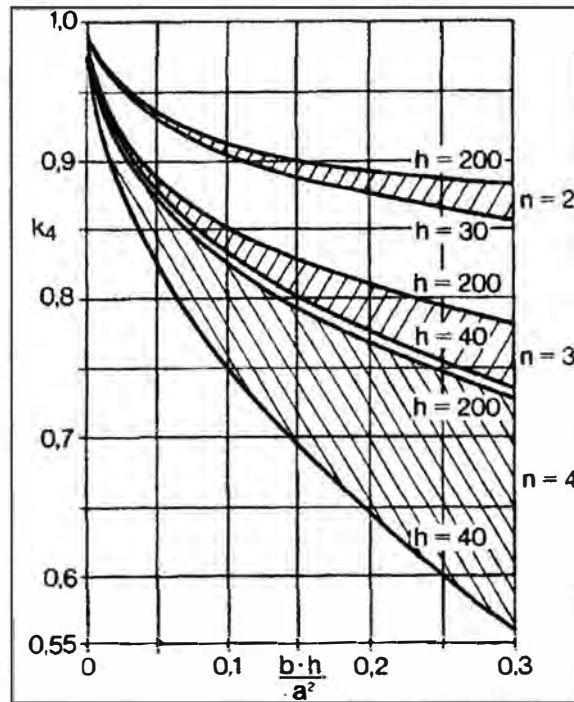


Fig. 2.5: Factor K_4 para espesor de barras $S=5\text{mm}$. Fuente: [2]

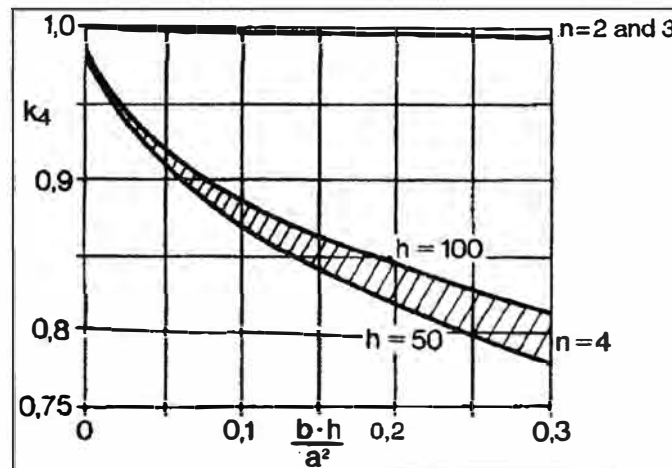


Fig. 2.6: Factor K_4 para espesor de barras $S=10\text{ mm}$. Fuente: [2]

La capacidad de transporte de las barras en forma permanente será entonces

$$I_{\text{cont}} = I_{\text{tabla}} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \quad (2.2)$$

en donde:

I_{tabla} = Capacidad de transporte de las barras que aparece en las tablas;

I_{cont} = Capacidad de transporte de las barras a condiciones reales de instalación.

Tabla N° 2.6: Factor K5.

ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR m	FACTOR K5	
	INTERIOR	EXTERIOR (1)
1000	1	0.98
2000	0.99	0.94
3000	0.96	0.89
4000	0.9	0.83

Fuente: [2]

Se debe de cumplir que $I_r \leq I_{cont}$.

I_r = corriente a transportar requerida en el proyecto.

(1) Reducción más pequeña en latitud geográfica. encima de 60° y/o con aire pesadamente cargado por polvo.

2.2 Cálculo por Corrientes Armónicas

Como las corrientes contaminadas con armónicos tienen un verdadero valor eficaz de corriente (TRMS = true rms) más elevado que el medido por los instrumentos de valor promedio (RMS), es posible que las barras instaladas sean de unas secciones inferiores a las necesarias y se calienten mucho más de lo esperado. El resultado del calentamiento es la degradación del material aislante, los fallos prematuros y el riesgo de incendios.

Las barras colectoras se dimensionan calculando el equilibrio entre la disipación del calor por convección, radiación y el calentamiento debido a las pérdidas resistivas (capítulo 3).

La temperatura de equilibrio que se alcanza debido al calentamiento, es la temperatura de servicio de la barra colectora y se diseña de modo que dicha temperatura sea lo bastante baja para que no se produzca un envejecimiento prematuro en los materiales de aislamiento y soporte, por ejemplo 65°C.

El flujo de una corriente no sinusoidal en un conductor causará un calentamiento adicional por encima de lo que se esperaría para el valor rms de la forma de onda. Esto es debido a dos fenómenos conocidos como "efecto Skin" (tendencia de la corriente de acumularse en la capa externa del conductor debido a la autoinducción del mismo [6]) y "efecto proximidad" (distorsión de la distribución de corriente debida a la inducción entre las corrientes de los conductores de ida y de retorno [6]) que varían en función de la frecuencia así como también del tamaño del conductor (capítulo 2.1). Como resultado de

estos dos efectos, la resistencia efectiva AC, R_{AC} , es elevada con respecto a la resistencia DC, R_{DC} , especialmente para conductores largos.

Cuando una onda de corriente que es abundante en armónicos de alta frecuencia, circula por un conductor, la resistencia R_{AC} equivalente es elevada y se traduce en un aumento de las pérdidas $I^2 R_{AC}$.

Suponiendo que la resistencia no cambia cuando la barra transporta la corriente adicional; entonces, para el dimensionamiento de las barras colectoras debemos conocer los valores de las corrientes de inyección armónica de la(s) fuente(s) hacia la red y determinar la capacidad total al que estará sometido las barras. Si en caso esto no fuese posible podemos considerar que el valor del armónico I_h es inversamente proporcional al orden del armónico: [3]

$$I_h = I_1 / h \quad (2.3)$$

$$h = pn \pm 1 \quad (2.4)$$

de donde:

- I_h = Valor de corriente de la h -th armónica;
- n = 1,2,3,...;
- p = Es un entero múltiplo de seis.

Luego, el valor total de corriente de pérdidas I_{TRMS} , será:

$$I_{TRMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (2.5)$$

En el capítulo 3 se evaluarán las pérdidas de calor en las barras colectoras debido al valor real de corriente (TRMS) y aumento de temperatura.

NOTAS:

Los efectos de los armónicos pueden eliminarse reduciendo la magnitud de las corrientes o voltajes armónicos que se producen en el sistema. La reducción puede hacerse mediante la instalación de filtros o mediante conexión de la carga a un nivel de tensión para el cual el efecto de los armónicos sea menos considerable. [3]

El objetivo de un filtro de armónicos es proporcionar una trayectoria a tierra de baja impedancia para los armónicos de voltaje o corriente, con el fin de facilitar su circulación a tierra y prevenir su propagación en el resto del sistema. [3]

2.3 Cálculo por Esfuerzos Electrodinámicos

El paso de la corriente en conductores paralelos origina fuerzas que actúan y se reparten uniformemente a lo largo de los conductores. Estas fuerzas son especialmente grandes en el caso de un cortocircuito y producen esfuerzos sobre los conductores y sobre los elementos de fijación. Por este motivo las barras deben de diseñarse para hacer frente a la intensidad de cortocircuito máximo posible.

2.3.1 Transitorios en un Circuito R-L.

Para calcular la corriente de cortocircuito inicial a la que estarán sometidos las barras colectoras analizaremos un circuito R-L cuando se le aplica una tensión sinusoidal (ver figura 2.7).

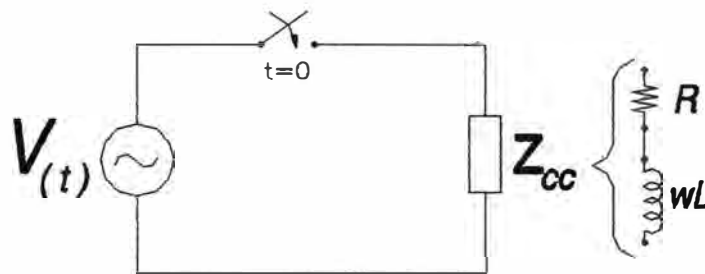


Fig. 2.7: Circuito básico RL. Fuente: diseño propio

Sea:

$$V = V_m \text{Sen}(wt + \alpha) \quad (2.6)$$

la tensión aplicada; donde para $t=0$ es el instante en que se aplica la tensión.

Por la Ley de Kirchhoff relativa a la tensión en el circuito de la figura 2.7, se tiene:

$$V = V_m \text{Sen}(wt + \alpha) = R i + L \frac{di}{dt} \quad (2.7)$$

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$i = \underbrace{\frac{V_m}{Z} \text{Sen}(wt + \alpha - \phi)}_{\text{Término Estacionario}} - \underbrace{\frac{V_m}{Z} e^{-Rt/L} \text{Sen}(\alpha - \phi)}_{\text{Término Transitorio}} \quad (2.8)$$

en donde:

$$Z = \sqrt{R^2 + w^2 L^2} \quad (2.9) \quad \text{y} \quad \phi = \text{ArcTan} \frac{wL}{R} \quad (2.10)$$

Para las ecuaciones anteriores es necesario hacer las siguientes observaciones:

El ángulo α representa la fase de la onda de tensión a la que se cierra el interruptor ($t=0$) y se le denomina "ÁNGULO DE CIERRE". El ángulo α es el desplazamiento angular entre el punto de $v=0$ y el punto $t=0$ (ver figura 2.8) medido positivamente desde el punto donde $v=0$ y la dv/dt es positiva.

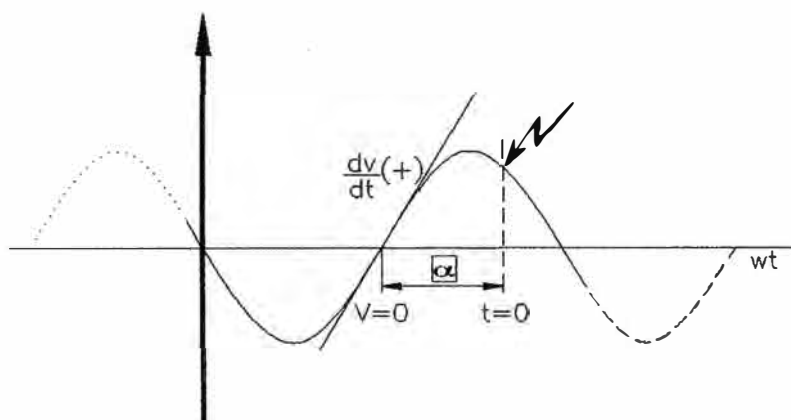


Fig. 2.8: Significado físico del ángulo alfa α . Fuente: diseño propio

El ángulo α suministra un medio conveniente de examinar los fenómenos transitorios de corriente alterna. En general la magnitud de un transitorio de corriente alterna depende del tiempo del ciclo en la cual se efectúa la conmutación del interruptor.

La mayoría de las conmutaciones se realiza sin tener en cuenta o sin conocer el punto de la onda de tensión donde comienza el periodo transitorio. En estos casos para la ejecución de un proyecto se analiza el efecto de iniciar la perturbación transitoria en diferentes puntos de la onda de tensión. Esto se realiza dando diversos valores a α .

El término estacionario varía sinusoidalmente con el tiempo, mientras el término transitorio es no periódico y decae exponencialmente con una constante de tiempo igual a R/L . A menudo al término transitorio se le denomina "COMPONENTE DIRECTA DE LA CORRIENTE" de un circuito R-L, por ser unidireccional. Esta componente unidireccional y decreciente de la corriente es de interés teórica, porque es en parte responsable de los cambios radiales que tienen lugar en las impedancias de los generadores síncronos, durante los períodos de transición.

La fórmula (2.8) puede escribirse:

$$i = \frac{|V_m|}{|Z|} k_{c1} \quad (2.11)$$

La corriente máxima de cortocircuito será igual a:

$$I_p = k_{c1} \times \sqrt{2} \times I_{cc} \quad (2.12)$$

en donde:

I_p = Corriente máxima de cortocircuito;

I_{cc} = Corriente de cortocircuito eficaz sin tener en cuenta el efecto de la componente directa;

$$I_{cc} = \frac{|V_m|}{\sqrt{2} |Z|} \quad (2.13)$$

k_{c1} = Factor de impulso que dependerá de α y ϕ para un determinado circuito R-L.

Cuando calculamos la corriente I_p de cortocircuito máximo, defectos secuenciales son desatendidos. Los cortocircuitos trifásicos se tratan como si este ocurriese simultáneamente en los tres conductores. De la expresión: $I_p = k_{c1} \times \sqrt{2} \times I_{cc}$

El factor k_{c1} considera el decaimiento de la componente d.c. Puede ser calculado como:

$$k = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-3R/X} \quad (2.14)$$

o tomado de la figura 2.9.

El cálculo exacto de i_p con el factor κ es posible solamente en redes con ramas que tienen los mismos cocientes R/X . Si una red incluye ramas paralelas con cocientes extensamente diversos R/X , los siguientes métodos de aproximación pueden ser aplicados:

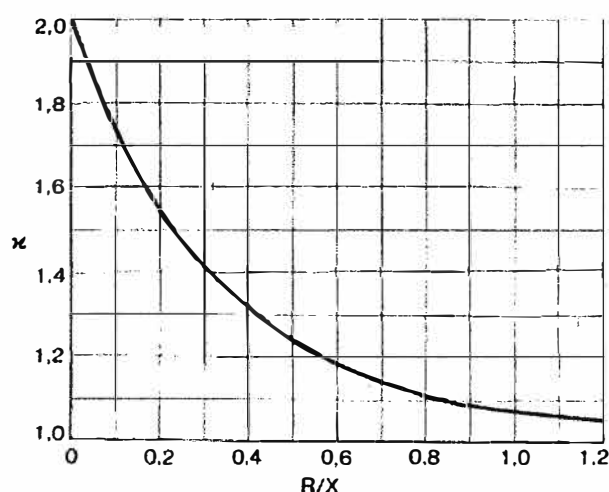


Fig. 2.9: Significado físico del ángulo alfa " α ". Fuente: [2]

El valor máximo de $k = 2$ se obtiene para $\alpha = 0$, y es logrado solamente en el caso límite teórico con una resistencia efectiva de $R = 0$ en el punto de cortocircuito. La experiencia demuestra que con un cortocircuito en los terminales del generador el $\kappa = 1,8$ no es excedido para máquinas menores de 100 MVA.

Sin embargo, con una unidad generadora conectada y un transformador de alta potencia, un valor de $\kappa = 1,9$ se puede alcanzar en circunstancias desfavorables en caso de cortocircuito cerca del transformador en su lado de alto voltaje, debido al cociente muy pequeño R/X del transformador. Igual se aplica a las redes con una alta potencia de falla si un cortocircuito ocurre después de un reactor.

2.3.2 Esfuerzos Electrodinámicos en Barras

En caso de presentarse un cortocircuito, las barras son sometidas a fuerzas particularmente altas que tensionan los conductores por el doblar y los medios de fijación por el voladizo en forma de presión o fuerza extensible. Esta es la razón por la cual las barras colectoras son diseñadas para la corriente de carga y para resistir la corriente máxima del cortocircuito.

a) Entre dos elementos conductores

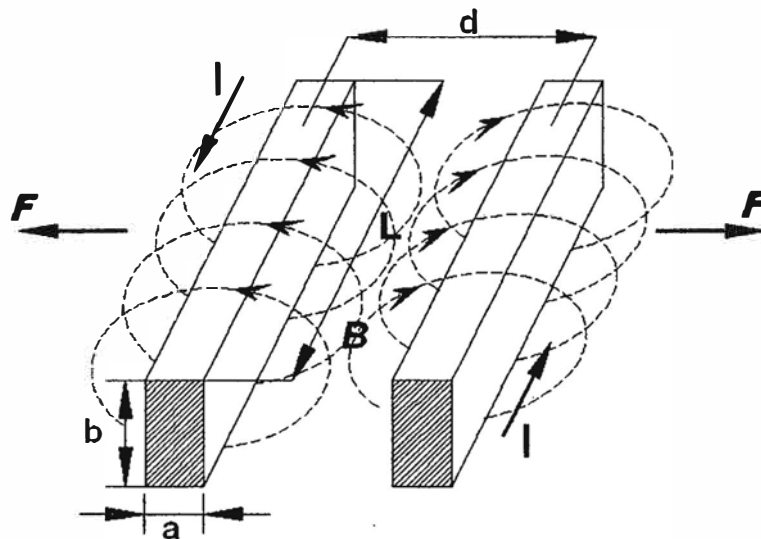


Fig. 2.10: Fuerza entre dos barras rígidas. Fuente: diseño propio

$$F = B \cdot I \cdot L ; \quad (\text{Ley de Laplace}) \quad (2.15)$$

Las líneas de inducción magnética para un alambre recto largo que conduce una corriente I son círculos con centro en el alambre y B a una distancia "d" del alambre está dado por:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (\text{Ley de Biot y Savart}) \quad (2.16)$$

Remplazando B en (2.15)

$$F = \frac{\mu_0 \cdot I^2 \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (2.17)$$

en donde:

- μ_0 = Constante de permeabilidad $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Weber/amp-m;
- I = Corriente que circula por Las barras en kA;
- L = Distancia entre apoyos en cm;
- d = Distancia entre conductores en cm.

Reemplazando en (2.17) los valores anteriores y efectuando los respectivos cambios de unidades, se tiene:

$$F = 2.04 \frac{I^2 \cdot L}{d} \times 10^{-2} \quad \text{kg-f} \quad (2.18)$$

o si se pone en función de la corriente de cortocircuito de la ecuación (2.12), se obtiene:

$$F = 13.265 \frac{I_{cc}^2 \cdot L}{d} \times 10^{-2} \quad \text{kg-f} \quad (2.19)$$

En el caso de un cortocircuito bifásico en un sistema trifásico, la corriente eficaz I_{cc} sin tener en cuenta el efecto de la componente directa será:

$$I_{cc} = \frac{V_n}{2 \cdot Z_f} \quad (2.20)$$

en donde:

- V_n =: Tensión eficaz de la línea en kV;
- Z_f =: Impedancia por fase en ohmios.

b) Entre tres elementos conductores

Si en las tres barras colectoras circula un sistema balanceado de corrientes trifásicas, los valores instantáneos de estas según la ecuación (2.8):

$$i_r = \frac{V_m}{Z} \left[\text{Sen}(wt + \alpha - \phi) - e^{-\frac{Rt}{L}} \text{Sen}(\alpha - \phi) \right] \quad (2.21)$$

$$i_s = \frac{V_m}{Z} \left[\text{Sen}\left(wt + \alpha - \phi - \frac{2\pi}{3}\right) - e^{-\frac{Rt}{L}} \text{Sen}\left(\alpha - \phi - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.22)$$

$$i_t = \frac{Vm}{Z} \left[\text{Sen} \left(wt + \alpha - \phi - \frac{4\pi}{3} \right) - e^{-Rt/L} \text{Sen} \left(\alpha - \phi - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \quad (2.23)$$

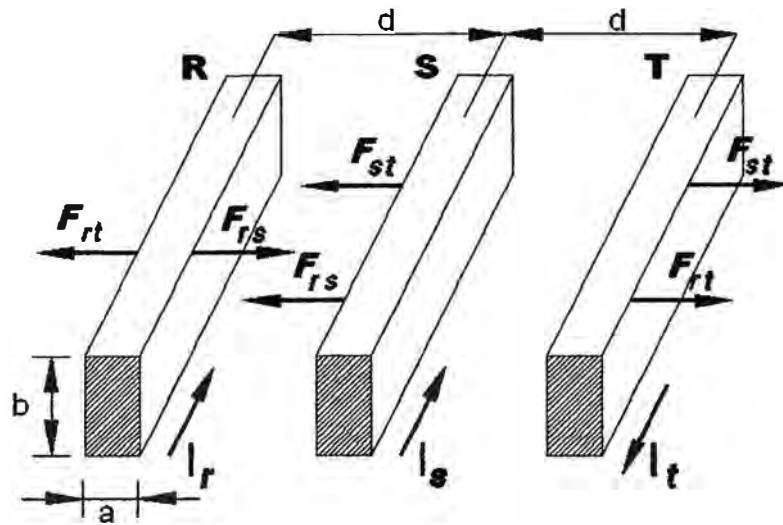


Fig. 2.11: Fuerza entre tres barras rígidas. Fuente: diseño propio

Observando la figura 2.11, se deduce que la fuerza máxima se presentará en el conductor central, debido a que la distancia a los otros dos conductores es el más corto y por lo tanto, bajo condiciones similares de corriente, se tendrá en esta barra el esfuerzo máximo, por lo tanto la fuerza máxima será:

$$F_s = F_{rs} + F_{st} \quad (2.24)$$

$$F_s = \frac{\mu_0 \cdot L \cdot i_s \cdot i_r}{2 \cdot \pi \cdot d} + \frac{\mu_0 \cdot L \cdot i_s \cdot i_t}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (2.25)$$

$$F_s = \frac{\mu_0 \cdot L \cdot i_s}{2 \cdot \pi \cdot d} (i_r + i_t) \quad (2.26)$$

como $i_r + i_s + i_t = 0$; reemplazando en la ecuación 2.26, se obtiene:

$$F_s = - \frac{\mu_0 \cdot L \cdot i_s^2}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (2.27)$$

La fuerza F_s será máximo cuando i_s es máximo y al igual que en el acápite 2.1, i_s puede ser expresado como:

$$i_s = \frac{|Vm|}{|Z|} k_{C3} \quad (2.28)$$

El valor de k_{C1} , será el mismo para k_{C3} con la diferencia que el valor máximo corresponderá ahora para $\alpha = 120$. Con las mismas consideraciones para k_{C1} , se considera el valor máximo de $k_{C3} = 1,8$, por lo que los valores máximos de F_s serán:

$$F_s = - 2.04 \frac{I_s^2 \cdot L}{d} \times 10^{-2} \text{ kg-f} \quad (2.29)$$

$$F_s = - 13.265 \frac{I_{cc}^2 \cdot L}{d} \times 10^{-2} \text{ kg-f} \quad (2.30)$$

En este caso I_{cc} es la corriente de cortocircuito trifásico y es igual a:

$$I_{cc} = \frac{V_n}{\sqrt{3} Z_f} \text{ kA} \quad (2.31)$$

en donde:

V_n = Tensión eficaz de la línea en kV;

Z_f = Impedancia por fase en ohmios.

También I_{cc} puede calcularse a partir de:

$$I_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_n} \text{ kA} \quad (2.32)$$

donde:

P_{cc} = Potencia de cortocircuito en MVA;

V_n = Tensión eficaz de la línea en kV.

En la práctica, para el cálculo de esfuerzos electrodinámicos se toma en cuenta solo el nivel de cortocircuito trifásico. Además teniendo en cuenta que los cálculos mecánicos se realizan con factores de seguridad de 2 a 2,5, no se justifica realizar un cálculo muy detallado de las corrientes que se presentarían en los diversos tipos de cortocircuito.

2.3.3 Cálculo Mecánico de las Barras

a) Barras Simples

Una barra colectora desde el punto de vista mecánico se trata de un caso intermedio entre una barra simplemente apoyada y una barra empotrada. En la figura 2.12 se presenta una comparación de los momentos flectores entre varios tipos de apoyos.

Se puede observar que una viga simplemente apoyada es la consideración más desfavorable que se puede asumir; luego, el momento actuante será igual a:

$$M = \frac{F_s \cdot L}{8} \text{ kgf-cm} \quad (2.33)$$

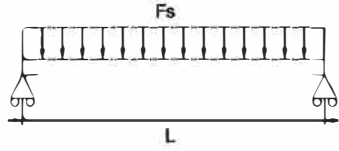
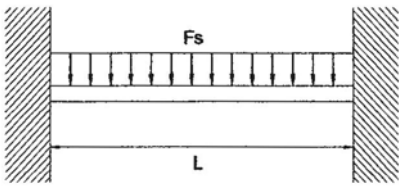
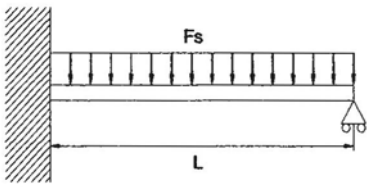
TIPO DE APOYO	GRÁFICA	MOMENTO FLECTOR
Simplemente apoyado		$\frac{F_s \cdot L}{8}$
Empotrado en ambos lados		$\frac{F_s \cdot L}{12}$
Empotrado en solo un extremo		$\frac{F_s \cdot L}{8}$

Fig. 2.12: Momentos flectores máximos para diversos tipos de apoyo. Fuente: diseño propio

en donde:

F_s = Fuerza total distribuida entre apoyos en kg;

L = Longitud entre apoyos en cm.

Además, para una barra que está bajo la acción de un momento flector se produce un esfuerzo de flexión máximo en la fibra extrema de valor:

$$\sigma_f = \frac{M}{J/C} \text{ kgf/cm}^2 \quad (2.34)$$

donde:

J = Momento de inercia en cm^4 ;

C = Distancia de la fibra extrema a la fibra neutra en cm.

Este esfuerzo debe de ser menor al esfuerzo máximo admisible por el material, es decir:

$$\sigma_m > \sigma_f \quad (2.35)$$

Para el cobre $\sigma_m = 1100 \text{ kgf/cm}^2$.

Al valor de J/C se le denomina "MODULO DE LA SECCIÓN" (W), y es función de la configuración geométrica de la barra.

$$\frac{M}{W_m} > \frac{M}{W} \quad (2.36)$$

$$W > W_m \quad (2.37)$$

$$W > \frac{M}{\sigma_m} \quad (2.38)$$

Es decir que el módulo de sección de la barra que se va utilizar en la instalación debe de ser mayor al calculado de dividir el momento actuante entre el esfuerzo máximo admisible del material.

b) Barras Colectoras Múltiples

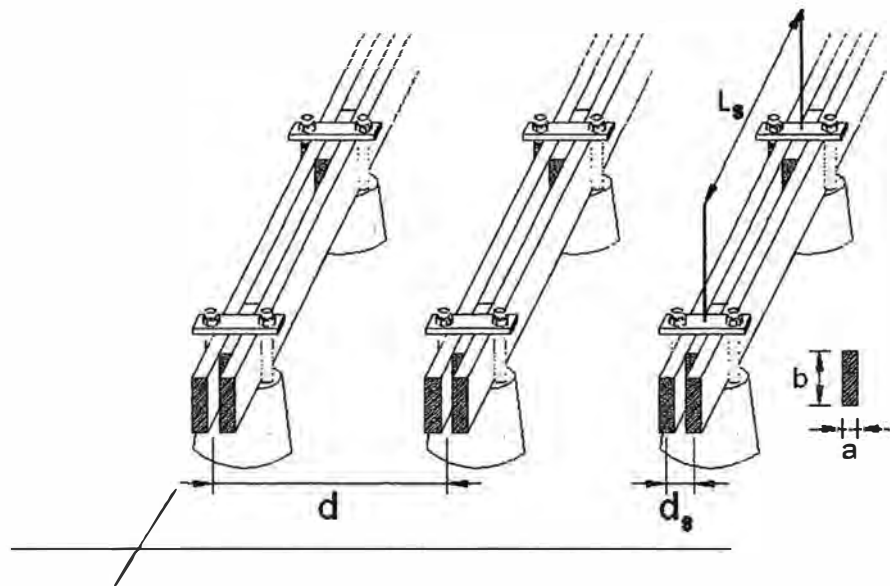


Fig. 2.12: Barras colectoras múltiples. Fuente: diseño propio

Cuando se tienen barras colectoras múltiples se presentan esfuerzos debido a la interacción entre las barras parciales. La fuerza entre barras parciales esta dado por la ecuación:

$$F_s = 13.265 \cdot \frac{L_s}{d_s} \cdot \left(\frac{I_{cc}}{N} \right)^2 \cdot 10^{-2} \quad (2.39)$$

en donde:

N = Número de conductores parciales;

- L_s = Distancia entre separadores en cm;
 d_s = Distancia entre barras parciales en cm.

El momento actuante esta dado por:

$$M_s = \frac{F_s \cdot L_s}{8} \quad \text{kgf} - \text{cm} \quad (2.40)$$

El esfuerzo de flexión en la fibra extrema es:

$$\sigma_s = \frac{M_s}{\frac{J_s}{C_s}} \quad \text{kgf} / \text{cm}^2 \quad (2.41)$$

Para verificar que una determinada disposición de barras colectoras múltiples soporta los esfuerzos debido a las corrientes de cortocircuito, se debe de cumplir que el esfuerzo máximo admisible por el material debe de ser mayor a la suma de los esfuerzos debido a las fuerzas entre las barras principales (ecuación 2.34) y entre las barras parciales (ecuación 2.41) es decir:

$$\sigma_m > \sigma_f + \sigma_s \quad (2.42)$$

2.4 Cálculo por Efectos Térmicos

2.4.1 Efectos Térmicos producidos por Corriente Nominal.

Las variaciones de temperatura en el servicio, originan una elongación o una contracción de las barras las que ocasionan esfuerzos de tracción o compresión respectivamente. La dilatación lineal de una barra esta dado por:

$$\Delta l = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \theta \quad (2.43)$$

en donde:

- α = Coeficiente de dilatación lineal en $1/^\circ\text{C}$:
 para el cobre = $0,000017 \text{ C}^{-1}$
 para el aluminio = $0,000023 \text{ C}^{-1}$
- L_0 = Longitud de la barra a la temperatura de montaje en cm;
 $\Delta \theta$ = Sobre elevación de temperatura en $^\circ\text{C}$;
 Δl = Variación de longitud de la barra en cm.

Según las normas DIN el máximo incremento de temperatura permisible es de 30°C , a partir de una temperatura ambiente de 35°C .

Los cambios de longitud a causa de las variaciones de temperatura pueden ocasionar importantes esfuerzos mecánicos en las barras, en sus soportes y en las

conexiones a aparatos si es que no se instalan las juntas de dilatación en las barras largas.

Las fuerzas resultantes se calculan igualando el cambio de longitud originado por la diferencia de temperaturas $(\theta - \theta_0) = \Delta\theta$ al cambio de longitud que originaría una fuerza mecánica F , es decir:

$$\Delta l = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta = \frac{F \cdot L_0}{E \cdot A} \quad (2.44)$$

en donde:

- F = Fuerza mecánica desarrollada en la barra en kgf;
- E = Módulo de elasticidad en kgf/cm²:
para el cobre = 1250000 kgf/cm²,
para el aluminio = 720000 kgf/cm²;
- A = Sección de la barra en cm².

2.4.2 Efectos Térmicos producidos por Corriente de Cortocircuito

El calentamiento que se produce en las barras a causa de la corriente de cortocircuito es un proceso de corta duración por lo que se puede asumir que:

No se produce cesión de calor al medio ambiente.

El calor específico del material permanece constante.

El cálculo de la elevación de temperatura en una barra debido a la corriente de cortocircuito permanente I_{ccp} durante un tiempo t se evalúa por intermedio de la siguiente formula:

$$\Delta\theta = \frac{K}{A^2} \cdot I_{ccp}^2 \cdot (t + \Delta t) \quad ^\circ\text{C} \quad (2.45)$$

en donde:

- I_{ccp} = Corriente de cortocircuito permanente en kA;
- t = tiempo del relé más el tiempo de apertura del interruptor en segundos;
- K = Constante del material:
para el cobre = 0,0058,
para el aluminio = 0,0149;
- A = Área de la barra en mm²;
- $\Delta\theta$ = Sobre elevación de la temperatura en $^\circ\text{C}$;
- Δt = tiempo que se incluye, con el objeto de tener en cuenta el mayor valor de la corriente de cortocircuito inicial:

$$\Delta t = (I_p / I_{cc})^2 \times T \quad (2.46)$$

T vale de 0,3 a 0,15 para cortocircuito trifásico y de 0,6 a 0,25 para cortocircuito bifásico.

Asumiendo que $I_{cc} = I_{ccp}$, que T tiene el máximo valor y con una temperatura de funcionamiento en la barra de 65°C, se tiene que la temperatura máxima que alcanzara la barra es:

$$\Delta \theta = 65 + \frac{K}{A^2} \cdot I_{ccp}^2 \cdot (t + \Delta t) \quad ^\circ C \quad (2.47)$$

Según las normas VDE, las temperaturas máximas admisibles para los siguientes materiales es:

para el cobre : $\theta_{cu} = 200^\circ C$,
 para el aluminio : $\theta_{al} = 180^\circ C$.

Es decir que el valor de θ calculado a través de la ecuación (2.47) debe de ser inferior a su correspondiente temperatura máxima admisible.

2.5 Resonancia

Las barras colectoras tienen una frecuencia natural de vibración "Fn" dada por la siguiente fórmula:

$$F_n = 112 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{G \cdot L^4}} \quad c/s \quad (2.48)$$

en donde:

E = Modulo de elasticidad del material de La barra = $1,25 \times 10^6$ kgf/cm²;

J = Momento de inercia = $\frac{b \cdot h^3}{12}$ cm⁴; (2.49)

G = Peso de la barra en kg/cm ($\rho_{cu} = 8,89$ gr/cm³);

L = Longitud de la barra en cm.

Sí este valor de Fn se encuentra comprendido entre el (-10%, 10%) de la frecuencia eléctrica ($F_e = 60$ Hz en Lima) o al doble de esta, puede producirse el fenómeno de la resonancia por lo cual se debe de verificar que se cumpla:

$$1,1 F_e < F_n < 0,9 F_e \quad (2.50)$$

$$2,2 F_e < F_n < 1,8 F_e \quad (2.51)$$

2.6 Cálculo de Aisladores

Después de que se determina la máxima fuerza entre apoyos, el esfuerzo de ruptura en la punta del aislador, estará dado por dicha fuerza dividida por un coeficiente de seguridad. (generalmente 0,5)

$$P = \frac{F_{\max}}{0.5} \text{ kg-f} \quad (2.52)$$

CAPÍTULO III

PÉRDIDA DE CALOR EN BARRAS RÍGIDAS

La disipación de calor en barras rígidas es por Convección y Radiación; mientras que sus pérdidas son por Efecto Joule.

3.1 Disipación de Calor por Convección

El aumento de temperatura en las barras debido al paso de la corriente genera un gradiente con la temperatura ambiente. Esta diferencia de temperatura, genera un flujo de aire caliente produciendo la disipación del calor hacia el ambiente. A esta forma de transferencia de calor se denomina pérdida por convección natural.

Las siguientes ecuaciones son utilizadas para calcular las pérdidas de calor por convección: [3]

$$W_v = \frac{7.66 \theta^{1.25}}{L^{0.25}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.1)$$

$$W_h = \frac{5.92 \theta^{1.25}}{L^{0.25}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.2)$$

$$W_c = \frac{7.66 \theta^{1.25}}{d^{0.25}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.4)$$

en donde:

- Θ = Elevación de temperatura en °C;
- L = Longitud o ancho de la barra en mm;
- d = Diámetro del tubo en mm.

En la figura 3.1 se aprecia el modo de empleo de las formulas. De esta figura 3.1, se puede apreciar que entre los arreglos (a) y (b), si la sección es igual en ambos casos, el arreglo (b) es el de mayor pérdida, solo si la separación entre barras en el arreglo (b) es menor que el grosor de las barra.

Disipación de calor por convección con refrigeración de aire forzada: si se emplea refrigeración forzada la pérdida por convección será calculado con la siguiente ecuación:

$$W_a = \sqrt{v} A \theta \quad (\text{W/m}) \quad (3.5)$$

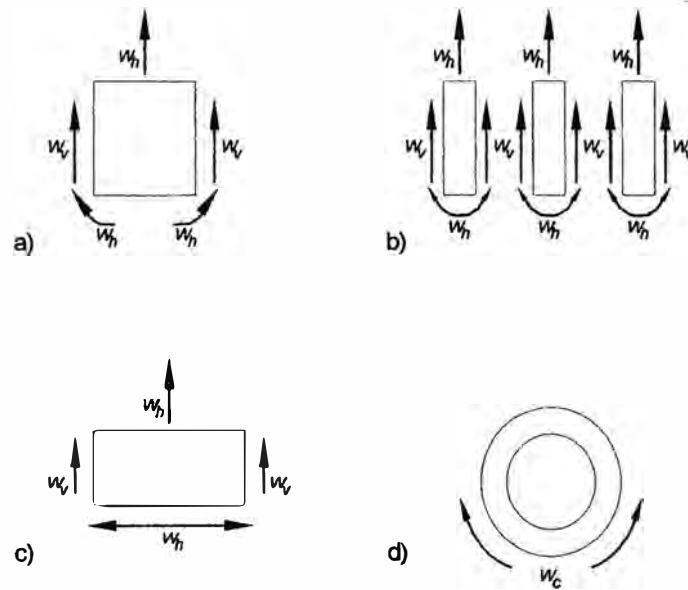


Fig. 3.1: Disipación por convección. Fuente: [4]

en donde:

- v = Velocidad del aire en m/s;
- A = Superficie por unidad de longitud de la barra (m^2/m).

3.1.1 Incremento de la temperatura debido a los Armónicos.

La transmisión de corrientes armónicas a través de las barras, provocará una elevación adicional de temperatura. Este aumento será proporcional al aumento en las pérdidas debido a los armónicos: [4]

$$\theta_{\text{FINAL}} = \theta \cdot \left(\frac{I^2}{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \right) \cdot 100 \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.6)$$

en donde:

- I_h = Valor de corriente de la h -th armónica;
- I = Corriente nominal

3.2 Disipación de Calor por Radiación

Todo material emite radiación electromagnética y su intensidad depende de los siguientes factores: la temperatura del material y su grado de emisividad (proporción de energía emitida en relación con la energía incidente). El grado de emisividad dependerá de las características de la superficie de la barra, mientras más pulida sea esta, su

emisividad será casi nula, y cuando se encuentra medianamente oscurecido por el paso del tiempo este valor puede llegar a ser superior a 0,7. En caso de barras pintadas, la emisividad será aproximadamente 0,9.

Valores típicos de emisividad en las barras de cobre:

Superficie pulida :	0,1
Parcialmente oxidada	0,4
Oxidada:	0,6
Pintada:	0,9

En la siguiente tabla se muestra el incremento porcentual en el valor de la capacidad de corriente cuando la emisividad aumenta de 0,1 a 0,9 en un arreglo trifásico.

Tabla Nº 3.1: Incremento porcentual de la capacidad de corriente.

Número de barras	CENTRO DE FASE (mm)		
	150	200	250
1	23	23	25
2	15	16	18
3	10	11	14
4	9	9	12
5	6	7	9

Fuente: [4]

La pérdida de calor por radiación esta dado por la siguiente formula: [3]

$$W_R = 5,7 \times 10^{-8} \cdot \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (W/m^2) \quad (3.7)$$

en donde:

- ε = Emisividad;
- T_1 = Temperatura absoluta del cuerpo en K (grados Kelvin);
- T_2 = Temperatura absoluta aire ambiente en K.

3.3 Pérdidas por Efecto Joule.

La pérdida de potencia en las barras en forma de calor se produce por la resistencia al paso de la corriente (efecto Joule). En el cobre la relación entre la resistencia y el tamaño del conductor es inversa.

La pérdida de potencia o pérdida de calor, por metro, esta dado por la siguiente ecuación:

$$W = I^2 \cdot R \quad (\text{W/m}) \quad (3.8)$$

En términos de Resistividad:

$$W = I^2 \cdot \rho \frac{l}{S} \quad (\text{W/m}) \quad (3.9)$$

en donde:

- I = Corriente nominal;
- R = Resistencia en Ohm;
- ρ = Resistividad del cobre = $1,70 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$;
- l = Longitud;
- S = Sección transversal.

3.3.1 Incremento de Pérdidas por efecto Joule debido a los Armónicos.

La transmisión de corrientes armónicas a través de un conductor, para nuestro caso en barras colectoras, provocará un incremento adicional en las pérdidas por efecto Joule.

La influencia de los armónicos en las pérdidas será: [8]

$$W_{\text{TOTAL}} = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R \quad (\text{W/m}) \quad (3.10)$$

CAPITULO IV

CÁLCULO ECONÓMICO DE BARRAS RÍGIDAS

4.1 Cálculo del Tamaño Mínimo

El conductor de tamaño mínimo, se encuentra limitado por la temperatura máxima que puede admitir el soporte del conductor. Para encontrar el tamaño mínimo de las barras debemos cumplir las siguientes consideraciones:

1. Encontrar el tamaño adecuado según la solicitud de corriente.
2. Calcular las pérdidas de calor a la temperatura de trabajo (por convección y radiación).
3. Calcular las pérdidas de calor debido a la corriente.
4. Comparar 2 con 3:
 - Si $2 \leq 3$ entonces aumentar el tamaño de la barra.
 - Si $2 \geq 3$ entonces este será el tamaño mínimo de la barra.

4.2 Cálculo del Tamaño Mínimo Económico:

Para el cálculo del tamaño mínimo económico debemos seleccionar el tamaño del conductor que nos genere el mínimo costo. Para ellos debemos de considerar los siguientes factores: [8]

- Costo del material.
- Costo de instalación.
- Costo de las pérdidas.

4.2.1 Costo de inversión

Para el costo de inversión de las barras rígidas consideramos la siguiente ecuación

$$C_{inv} = P_b + P_i + P_t \quad (\$/m) \quad (4.1)$$

en donde:

- P_b = Costo de la barra por metro (\$/m);
- P_i = Costo de instalación por metro y sección (\$/m.cm²) de conductor;

Pt = Precio de portabarras.

En la figura 4.1, se muestra el aumento del costo de inversión de las barras en función de su sección.

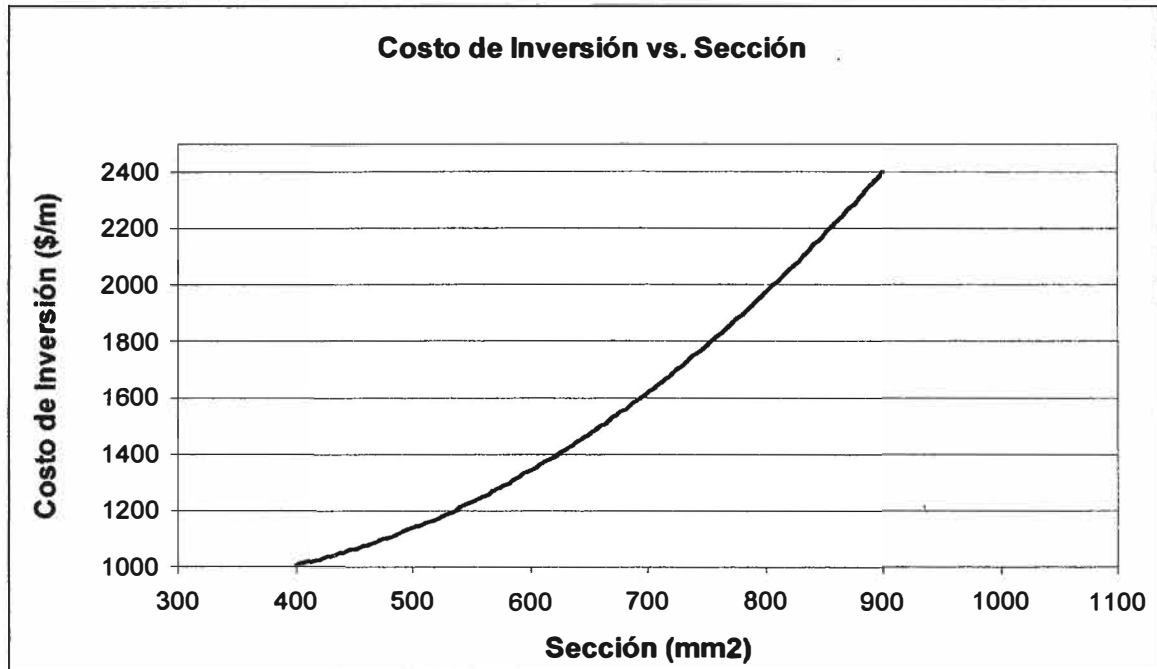


Fig. 4.1: Costo de inversión de barras colectoras. Fuente: diseño propio

4.2.2 Costo de las Pérdidas

De la ecuación de pérdida de potencia:

$$W = I^2 \cdot R \quad (W/m) \quad (4.2)$$

si tenemos N barras de una longitud L, entonces la pérdida de energía será: [9]

$$W = I^2 \cdot \frac{R \cdot N_b \cdot L}{1000} \quad (kW) \quad (4.3)$$

luego, como la energía es usualmente medida mensualmente, entonces tendremos:

$$W = I^2 \cdot \frac{R \cdot N_b \cdot L}{1000} \cdot T \quad (kW \text{ por mes}) \quad (4.4)$$

Siendo P (\$/kW), el costo de la energía mensual, al nivel de tensión determinada; tendremos:

$$C_j = I^2 \cdot \frac{R \cdot N_b \cdot L}{1000} \cdot T \cdot P \quad (\$ \text{ por mes}) \quad (4.5)$$

El valor de T x P puede ser calculado considerando el tiempo de operación en horas punta (hp) y fuera de punta (hfp) multiplicado por su respectivo costo (Cp, Cfp).

$$T \cdot P = C_p \cdot hp + C_{fp} \cdot h_{fp} \quad (\$/kW) \quad (4.6)$$

Los generadores no solo cobran la potencia suministrada, sino también el precio de demanda, debido a que su planta debe de ser mucho más grande para satisfacer la potencia requerida. Si el precio por kilowatt es D (\$ por mes), entonces la demanda por la potencia adicional tomada por la barra será:

$$C_d = I^2 \cdot \frac{R \cdot N_b \cdot L \cdot T}{1000} \cdot D \quad (\$ \text{ por mes}) \quad (4.7)$$

En la figura 4.2, se muestra reducción del costo de pérdidas de las barras al aumentarse la sección.

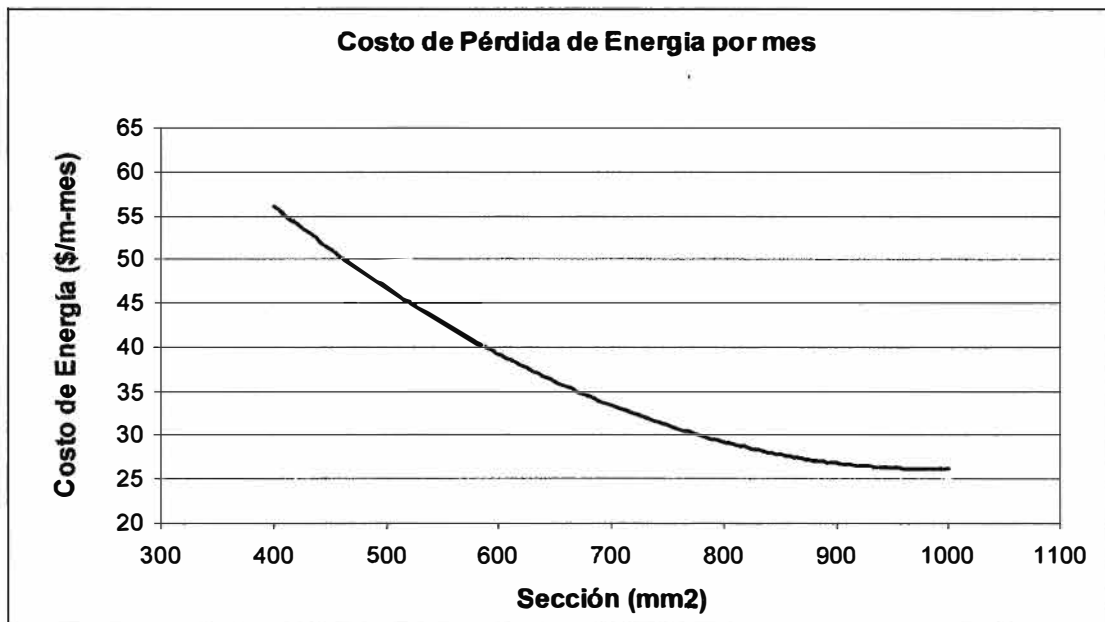


Fig. 4.2: Costo de las pérdidas de energía. Fuente: diseño propio

4.2.3 Costo Combinado de Inversión y el gasto de Energía

Mientras el costo de la instalación ocurre una vez en el tiempo (al principio del proyecto), los gastos de la pérdida de energía se aplican mensualmente en toda la vida del proyecto y bien pueden cambiarse durante aquel tiempo.

Si la vida del proyecto es para ser N años, habrá un total de 12N pagos mensuales de \$ (C_j + C_d). Si este total simplemente es añadido al costo de inversión C_{inv} obtenemos un valor (número) que es equivalente al dejar la cantidad \$ 12N (C_j + C_d) para futuros pagos al mismo tiempo que C_i es pagada. Es claro que esto no es el modo

más económico de realizar el pago para las pérdidas de energía porque el dinero dejado de lado podría ser invertido durante los períodos de hasta N años y ganar el interés mientras esto espera para ser usado.

Además, pequeñas cantidades podrían ser invertidas en el principio del proyecto, suficiente para pagar los gastos de las pérdidas más tarde. Estas pequeñas cantidades se conocen como "el Valor Presente" (PV) de cada pago futuro, al proceso de calcular cada PV como "el descuento", y es el inverso del interés compuesto.

La fórmula tiene en cuenta los cambios de futuros pagos causados por aumentos de la carga y costo de energía. [9]

$$PV = Q \cdot (\text{pago de electricidad del primer mes}), \quad \$ \quad (4.8)$$

$$PV = Q \cdot (C_j + C_d), \quad \$ \quad (4.9)$$

en donde:

$$Q = r_m \cdot \frac{(1 - r_a^N)}{(1 - r_m)} \quad (4.10)$$

La variable Q es el factor que combina el descuento con el incremento en potencia y costo de energía.

$$r_a = \frac{\left(1 + \frac{a}{100}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{b}{100}\right)}{1 + \frac{i}{100}} \quad (4.11)$$

$$r_m = (r_a)^{1/12} \quad (4.12)$$

en donde:

- N = La vida del proyecto en años;
- i = Interés del descuento, en % por año;
- a = Promedio del aumento de la carga, en % por año;
- b = Promedio del aumento del precio de energía durante N, en % por año;
- r_a = Cantidad auxiliar basada en pagos anuales;
- r_m = Cantidad auxiliar basada en pagos mensuales;
- PV = Valor Presente de 12N pagos mensuales.

El coste total equivalente de la implementación, no incluyendo el costo de la energía consumida por el proceso. Estará dado por:

$$\text{Costo Total Equivalente} = PV + C_{inv}, \quad \$ \quad (4.13)$$

Con la comparación conjunta con la selección del tamaño mínimo de la barra, minimizaremos los gastos de energía a lo largo de la vida del proyecto.

De la suma del valor actual con el costo de inversión, podemos hallar el tamaño mínimo económico comparando los costos totales para diferentes tamaños de barra. (ver figura 4.3)

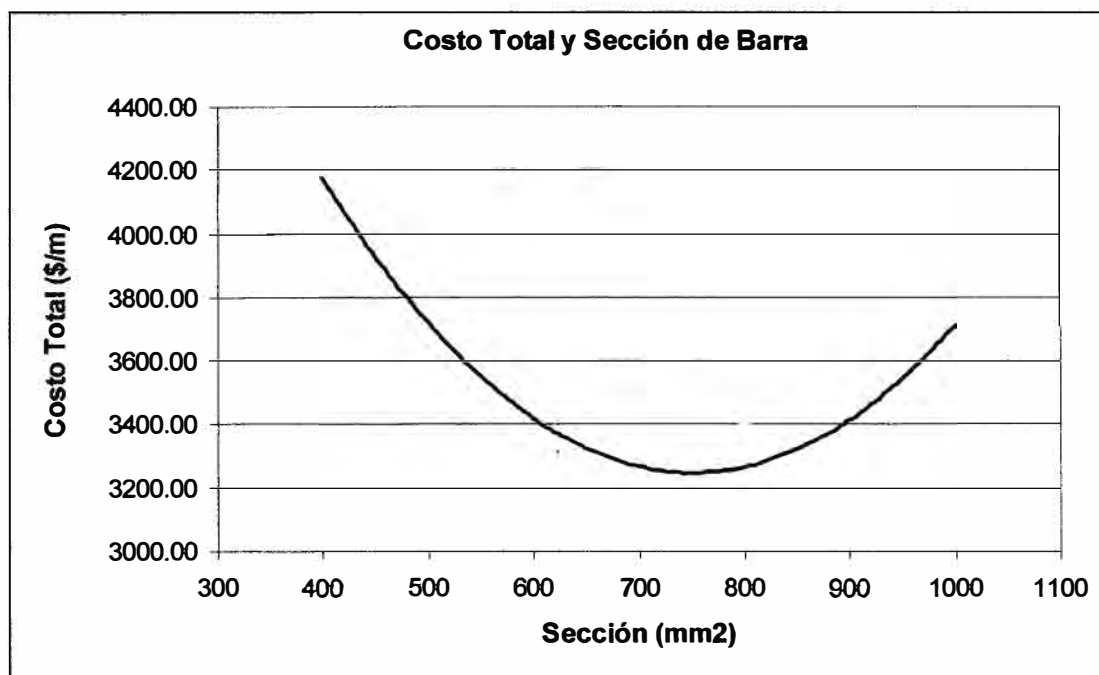


Fig. 4.3: Costo total equivalente versus sección de barra. Fuente: diseño propio

CAPITULO V

APLICACIÓN EN UNA SUBESTACIÓN DE 20MVA EN 22,9kV

Para mostrar los beneficios del cálculo técnico-económico, en la selección de las barras colectoras rígidas, primeramente realizaremos una selección por el método tradicional y luego por el modelo económico.

5.1 Cálculo de Barras Rígidas: Modelo Tradicional.

Consideraciones:

Potencia aparente nominal (MVA)	=	20MVA
Tensión nominal (kV)	=	22,9kV
Potencia de cortocircuito de entrada (Pcc)	=	400MVA
Factor de seguridad (Fk)	=	1,25
Altitud (H)	=	2500 msnm

5.1.1 Cálculo por corriente nominal

De la ecuación 2.1 se obtiene la corriente nominal (I_n):

$$I_n = \frac{KVA \times F_k}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{20 \times 10^3 \times 1.25}{\sqrt{3} \times 22,9} = 630,31 \text{ A}$$

Factores de corrección:

- K1 = 1 (Conductividad eléctrica a 20°C de 56 m/Ω-mm);
- K2 = 1 (Temperatura ambiente de 35°C y temperatura de barra de 65°C);
- K3 = 1 (Disposición de una sola barra);
- K4 = 1 (Debido a que L < 2m);
- K5 = 0,975 (Para una altitud de 2500 msnm. Tabla N°2.6);

Remplazando estos valores en la ecuación 2.2, se obtiene:

$$I_{\text{tabla}} = \frac{I_n}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5} = \frac{630,31}{0,975} = 646,48 \text{ A}$$

De la Tabla N° 2.1 elegimos las platinas de cobre de 40x10 mm pintadas, la cual tiene capacidad de corriente de 850 A > 646,48 A solicitados.

Para obtener la distancia de separación entre fases (d), previamente calculamos el factor de corrección por altura de trabajo (Fh):

$$F_h = 1 + (H - 1000) \times \frac{0,0125}{100} \quad (5.2)$$

Para H=2500m, se obtiene:

$$F_h = 1 + (2500 - 1000) \cdot \frac{0,0125}{100} = 1,1875$$

Distancia mínima entre conductores (d_{\min}):

$$d_{\min} = 0,1 + 0,01\text{m/kV} \quad (5.1)$$

Para una tensión de 22,9kV, se obtiene:

$$d_{\min} = 0,1 + 0,01\text{m/kV} \times 22,9 \text{ kV} = 0,329$$

Luego, multiplicando la distancia mínima (d_{\min}) por el factor de corrección (Fh) obtenemos la distancia mínima corregida (D_{\min}):

$$D_{\min} = d_{\min} \times F_h = 0,329 \times 1,1875 = 0,39\text{m}$$

Por lo tanto, consideramos $d = 54 \text{ cm}$ (al eje); una disposición de barras horizontal; y una separación entre apoyos (L) igual a 100cm (disposición inicial). En la figura 5.1 se muestra la distribución física de las barras colectoras.

5.1.2 Cálculo por esfuerzos electrodinámicos

Consideraciones:

- I_{cc} = Corriente de cortocircuito permanente en la Subestación Particular.
- I_p = Corriente máxima de cortocircuito.
- F = Esfuerzo entre dos barras en cortocircuito (kg).
- σ_f = Esfuerzo de flexión.
- M_b = Momento máximo entre barras.
- M_r = Momento resistente necesario.
- K_b = Esfuerzo máximo admisible del cobre (1000 a 1200 Kg/cm²)
- W_b = Momento propio de las barras de cobre.

Remplazando valores en la ecuación 2.12 y 2.32 obtenemos la corriente máxima de cortocircuito (I_p):

$$I_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_n} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 22,9} = 10,1 \text{ kA}$$

$$I_p = I_{cc} \cdot k \cdot \sqrt{2}, \text{ donde } k=1,8$$

$$I_p = 25,78 \text{ kA}$$

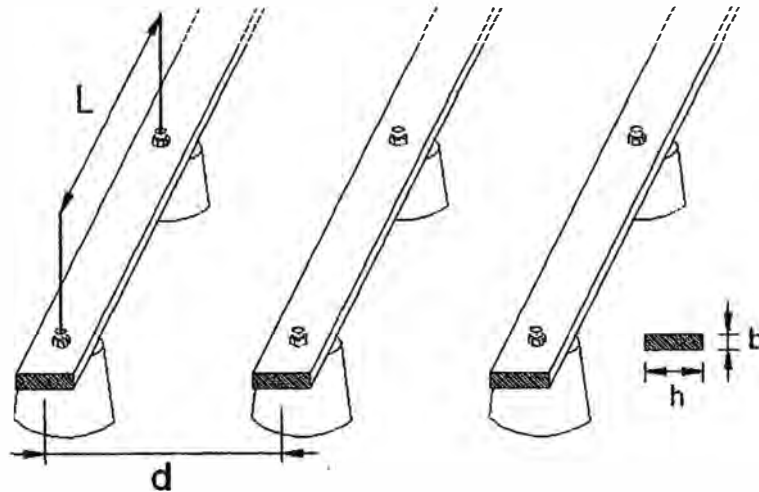


Fig. 5.1: Diagrama de distribución. Fuente: diseño propio

a) Esfuerzo entre barras (F):

Reemplazando valores en la ecuación 2.18, se obtiene:

$$F = 2,04 (I_p)^2 \times \frac{L}{d} \times 10^{-8} = 2,04 (25,78 \times 10^3)^2 \times \frac{100}{54} \times 10^{-8}$$

$$F = 22,59 \text{ kg.}$$

b) Momento flector máximo actuante (Mb):

De la ecuación 2.33 y reemplazando el valor de F, obtenemos:

$$M_b = \frac{F \times L}{8} = \frac{22,59 \times 100}{8} = 141,20 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Los valores estáticos de la barra/fase (ecuación 2.50) serán:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{1 \times 4^3}{12} = 5,33 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_f = \frac{M_b}{J/C} = \frac{141,20}{5,33/2,0} = 52,98 \text{ kgf/cm}^2$$

Como el esfuerzo máximo admisible del cobre es de: $\sigma_m = 1100 \text{ kgf/cm}^2$; se cumple:

$$\sigma_m > \sigma_f \quad (1100 > 52,98)$$

5.1.3 Cálculo por efectos térmicos

Parámetros

$\Delta\Phi$ = Sobre-elevación de temperatura (°C);
para el cobre se admite máx. 200 °C

K = Constante del material = 0,0058;

A = Sección de la barra = 400 mm²;

Φ_a = Temperatura previa al cortocircuito = 65 °C;

I_{cc} = Corriente de cortocircuito permanente en la Subestación Particular;

I_p = Corriente máxima de cortocircuito;

t = Tiempo de apertura de la protección = 1 segundo;

Δt = Tiempo adicional para tener en cuenta el calentamiento producido por la corriente de choque (I_p) en segundos;

T = Tiempo para cortocircuito Trifásico = 0,30 a 0,15.

Remplazando valores en las ecuaciones 2.46 y 2.47, obtendremos:

$$\Delta t = \left(\frac{I_p}{I_{cc}} \right)^2 \cdot T = \left(\frac{25,78}{10,1} \right)^2 \times 0,3 = 1,96 \text{ s.}$$

$$\Delta\theta = \frac{K}{A^2} \cdot I_{cc}^2 \cdot (t + \Delta t) = \frac{0,0058}{400^2} \cdot 10058^2 \cdot (1 + 1,96) = 10,91^\circ\text{C}$$

Por tanto se cumple: $\Phi_a + \Delta\Phi = 65^\circ\text{C} + 10,91^\circ\text{C} = 75,91^\circ\text{C} < 200^\circ\text{C}$

5.1.4 Cálculo por resonancia

De la ecuación 2.48:

$$F_n = 112 \sqrt{\frac{E \times J}{G \times L^4}}$$

siendo:

E = Modulo de elasticidad = $1,25 \times 10^6$ kg/cm²;

J = Momento de inercia de la barra = 5,33 cm⁴;

G = Peso de la platina:

$$G = \frac{8,89 \text{ gr/cm}^3 \cdot (4 \times 1) \text{ cm}^2}{1000 \text{ gr}} = 0,0356 \text{ kg/cm}$$

L = Longitud entre apoyos = 100 cm.

Reemplazando valores, se obtiene:

$$F_n = 112 \cdot \sqrt{\frac{1,25 \times 10^6 \times 5,33}{0,0356 \times 100^4}} = 153,35 \text{ c/s}$$

Luego, de las ecuaciones 2.50, 2.51 y con $F_e = 60 \text{ Hz}$ se cumple:

$$F_n \notin [54 - 66]$$

$$F_n \notin [108 - 132]$$

5.1.5 Cálculo de aisladores.

De la ecuación 2.52:

$$P = \frac{F}{0,5} = \frac{22,59}{0,5} = 45,18 \text{ kg - f}$$

se obtiene el esfuerzo (P) en la punta del aislador.

Para nuestro diseño se escoge un aislador, en donde el valor del esfuerzo resultante en la punta es: $R' = 400 \text{ kg} > 45,18 \text{ kg}$. Luego, el coeficiente de seguridad resultante será igual a $400/45,18 = 8,9 > 4$ (1/0,25)

En consecuencia, con el tamaño de barra escogido y la disposición empleada se cumple con las exigencias de corriente nominal y esfuerzos electrodinámicos.

5.2 Cálculo de Barras Rígidas: Modelo Económico.

5.2.1 Cálculo del tamaño mínimo de barra.

a) Disipación de calor por convección.

Reemplazando valores en las ecuaciones 3.1 y 3.2 obtenemos:

Para $\Theta = 65 - 35 = 30^\circ\text{C}$

$$W_v = \frac{7,66 \theta^{1,25}}{L^{0,25}} = \frac{7,66 \times 30^{1,25}}{10^{0,25}} = 302,43 \text{ W/m}^2$$

$$W_h = \frac{5,92 \theta^{1,25}}{L^{0,25}} = \frac{5,92 \times 30^{1,25}}{40^{0,25}} = 165,28 \text{ W/m}^2$$

Luego, de la figura 5.2 se obtiene que la pérdida total por convección será:

$$P_c = 2 \times (W_v \times 0,04 + W_h \times 0,01) \times 3 = 82,50 \text{ W/m}$$

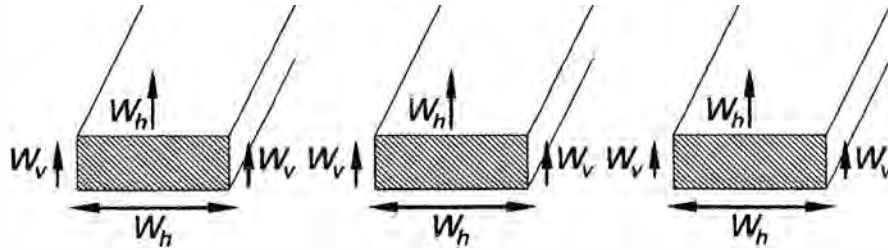


Fig. 5.2: Disipación de calor por convección. Fuente: diseño propio

b) Disipación de calor por radiación

De la ecuación 3.77, se obtiene, para $\varepsilon = 0,9$;

$$T_1 = 65 + 273,15 = 338,15 \text{ K};$$

$$T_2 = 35 + 273,15 = 308,15 \text{ K}.$$

$$W_R = 5,7 \times 10^{-8} \cdot \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) = 5,7 \times 10^{-8} \times 0,9 (338,15^4 - 308,15^4)$$

$$W_R = 208,18 \text{ W/m}^2$$

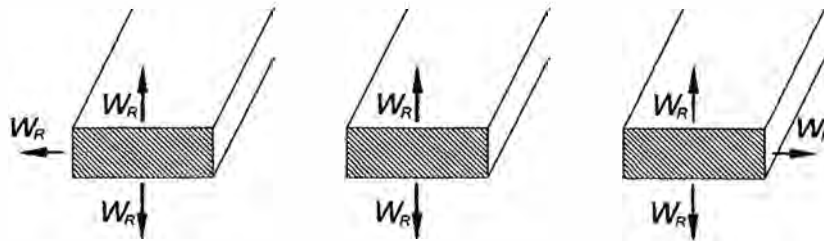


Fig. 5.3: Disipación de calor por Radiación. Fuente: diseño propio

De la figura 5.3 se obtiene:

$$Pr = W_R \times 0,01 \times 2 + W_R \times 0,04 \times 6 = 54,12 \text{ W/m}$$

c) Pérdidas por efecto Joule

De la ecuación 3.9, reemplazando valores se obtiene:

$$\rho = \text{Resistividad del cobre: } 1,70 \times 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$$

$$W = I^2 \cdot \rho \frac{l}{S} = 646,48^2 \times 1,7 \times 10^{-8} \frac{1}{4 \times 10^{-4}} = 17,76 \text{ W/m}$$

$$\text{Para } N = 3 \text{ barras se obtiene: } W_J = W \times N = 17,76 \times 3 = 53,29 \text{ W/m}$$

Para hallar el tamaño mínimo, se debe cumplir: $Pr + Pc \geq W_j$

Remplazando valores, se obtiene:

$$82,50 + 54,12 = 136,63 > 53,29 \text{ (W/m)}$$

Por lo tanto, el tamaño de barra escogida (40x10mm) cumple con las condiciones de tamaño mínimo (ver capítulo 4).

5.2.2 Cálculo del tamaño mínimo económico

a) Costo de las pérdidas.

Consideraciones:

W = Pérdidas por efecto Joule (W/m);

N_b = Número de barras (3);

N_p = Número de Horas Pico al mes (360 h);

C_p = Costo de energía en horas pico (2,5 \$/kW);

N_{fp} = Número de horas fuera de pico al mes (120 h);

C_{fp} = Costo de energía en horas fuera de pico (1,2 \$/kW);

N = La vida del proyecto en años (5 años);

I = Interés del descuento, en % por año (5 % por año);

a = Promedio del aumento de carga (1 % por año);

b = Promedio del aumento del precio de energía durante N años, (0 % por año);

r_a = Cantidad auxiliar basada en pagos anuales;

r_m = Cantidad auxiliar basada en pagos mensuales;

PV = Valor Presente de $12N$ pagos mensuales (\$/m);

D = Precio por potencia adicional tomada (50 \$/kWh-mes).

Remplazamos estos valores, obtenemos:

Ecuación 3.9:

$$W = I^2 \cdot \rho \frac{l}{S} = 646,48^2 \times 1,7 \times 10^{-8} \frac{1}{4 \times 10^{-4}} = 17,76 \text{ W/m}$$

Ecuación 4.5 y 4.6:

$$C_j = W \cdot \frac{N_b}{1000} (C_p \cdot h_p + C_{fp} \cdot h_{fp}) = 17,76 \times \frac{3}{1000} (2,5 \times 360 + 1,2 \times 120)$$

$$C_j = 55,63 \text{ \$/m - mes}$$

Ecuación 4.7:

$$C_d = W \cdot \frac{N_b}{1000} (D) = 17,76 \times \frac{3}{1000} (50) = 2,66 \text{ \$/m - mes}$$

Ecuación 4.11 y 4.12:

$$r_a = \frac{\left(1 + \frac{a}{100}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{b}{100}\right)}{1 + \frac{i}{100}} = \frac{\left(1 + \frac{1}{100}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{0}{100}\right)}{1 + \frac{5}{100}} = 0,9715$$

$$r_m = (0,9715)^{1/12} = 0,9976$$

Ecuación 4.10:

$$Q = r_m \cdot \frac{(1 - r_a^N)}{(1 - r_m)} = 0,9976 \cdot \frac{(1 - 0,9715^5)}{(1 - 0,9976)} = 55,8$$

Ecuación 4.9:

$$PV = Q \cdot (C_j + C_d) = 55,8 \times (55,63 + 2,66) = 3253 \text{ \$/m}$$

El costo de inversión para la instalación de las barras se obtiene de la ecuación 4.1:

$$C_{inv} = P_b + P_i + P_t$$

considerando:

$$P_b = \text{Costo de barra } 40 \times 10 \text{ mm}^2 = 150 \text{ \$/m}$$

$$P_i = \text{Costo de instalación} = 50 \text{ \$/m.cm}^2 - c/\text{barra}$$

$$P_t = \text{Precio de juego portabarra} = 30 \text{ \$}$$

Remplazando valores:

$$C_{inv} = P_b + P_i + P_t = (150 + 50 \cdot 4 \cdot 1) \cdot 3 + 30 = 1080 \text{ \$/m (valor aproximado)}$$

Finalmente con la ecuación 4.13, obtenemos el costo total equivalente:

$$\text{Costo Total Equivalente} = PV + C_{inv} = 3253 + 1080 = 4333 \text{ \$/m}$$

Para hallar el tamaño mínimo económico debemos realizar nuevamente el cálculo del costo total equivalente en barras de mayor sección. En la Tabla N° 5.1 se muestran

los valores de pérdida de energía, costo de inversión y el costo total equivalente.

Tabla N° 5.1: Cálculo del tamaño mínimo económico.

Barra	Costo de Pérdida de Energía	Valor Actual (PV)	Costo de Inversión	Costo Total Equivalente
mm	\$/m-mes	(\$/m)	(\$/m)	(\$/m)
40x10	58.30	3252.90	1080.00	4332.90
50x10	46.64	2602.32	1040.00	3642.32
60x10	38.86	2168.60	1248.00	3416.60
65x10	35.87	2001.79	1427.60	3429.39
70x10	33.31	1858.80	1633.12	3491.92
80x10	29.15	1626.45	1919.74	3546.20
90x10	25.91	1445.73	2243.69	3689.43

En el anexo A podemos encontrar los cálculos parciales de la tabla N°5.1.

De la tabla N° 5.1 observamos que la barra que cumple con las condiciones de tamaño mínimo económico es de 60x10mm.

En el proceso de obtener el tamaño mínimo económico se aumenta la sección de la barra para disminuir las pérdidas de energía por efecto Joule. Al incrementar el tamaño estamos asegurando el cumplimiento de los esfuerzos electrodinámicos.

La sección mínima económica (60x10mm) difiere de la obtenida en el cálculo tradicional en 2cm de ancho (40x10mm); sin embargo, con otras condiciones de diseño, (por ejemplo: potencia nominal, nivel de tensión y potencia de corto circuito) es posible que la sección económica obtenida sea más grande (por ejemplo 130x10mm) y no se pueda cumplir con las condiciones de mínima distancia de separación entre fases; en consecuencia, se deberá duplicar el número de barras por fase, dividir la sección (2-65x10mm por fase) y realizar nuevamente el cálculo de esfuerzos.

Con la barra de 40x10mm se obtiene un costo total de 4332.90 \$/m y con la barra de 60x10mm un costo total de 3416.60\$/m. Esta diferencia de aproximadamente 900\$/m es el ahorro en el gastos por pérdida en energía a lo largo de la vida del proyecto.

Graficando para cada barra el costo total equivalente en función de su sección, obtenemos la figura 5.4.

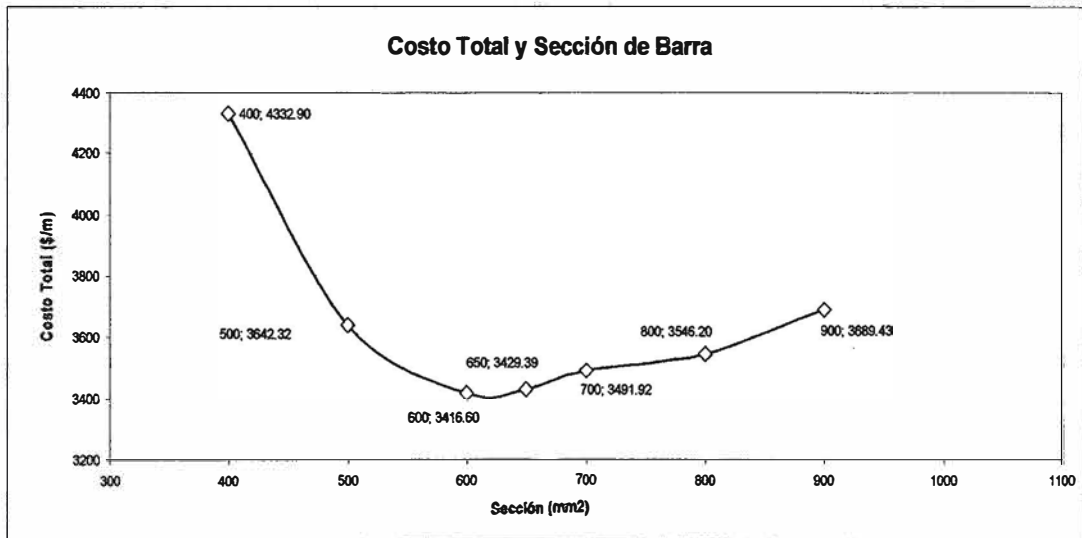


Fig. 5.4: Obtención del tamaño mínimo económico.

El tiempo de vida del proyecto $N=5$ es utilizado como ejemplo de cálculo para un proyecto inicial. Si este tiempo se incrementa (por ejemplo $N=10$), entonces la barra de tamaño mínimo económico será de $90 \times 10 \text{ mm}$ (ver resultados parciales en anexo A).

En el ejemplo desarrollado no utilizamos modelo alguno de fuente armónica con el objetivo de mantener los cálculos lo más semejante posible al modelo tradicional; en el que se utiliza 1,25 veces la corriente nominal para prever estos casos.

CONCLUSIONES

1. La metodología seguida en el cálculo tradicional nos permite cumplir con las exigencias eléctricas y dinámicas a las que se someterán las barras colectoras en condiciones de operación normal y falla (corto circuito).
2. Los factores de seguridad (factor de seguridad $F_k=1,25$; distancia de separación de fases = 50cm > distancia mínima = 40cm; coeficiente de seguridad en portabarras = 8,9) nos permiten prever futuras solicitudes eléctricas y dinámicas que se presentarán a lo largo de la vida del proyecto (por ejemplo: el incremento de carga y el corto circuito); así, como otras exigencias eléctricas y físicas no consideradas en el diseño (por ejemplo: sobretensiones, acumulaciones de polvo, humedad, flexiones y contracciones en las barras).
3. Con el cálculo tradicional se cumple con todas estas exigencias físicas; sin embargo, como resultado no se obtiene un tamaño de conductor que nos permita un menor costo por el consumo de energía no utilizable (pérdidas).
4. El cálculo económico nos permite relacionar las pérdidas de energía por efecto Joule con el costo de energía, calcular la barra de menor tamaño y obtener un ahorro en pérdidas a largo tiempo.
5. El cálculo será más exacto y significativo si consideramos otros factores pertenecientes al consumo de energía; por ejemplo: la tasa de crecimiento del precio de la energía y la distribución real de la demanda.
6. La optimización del diseño de barras colectoras se obtiene al emplear en forma conjunta el cálculo tradicional y el cálculo económico.

ANEXO A.

Cálculos parciales para obtener la barra de tamaño mínimo económico (N=5)

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CÁLCULO DE COSTOS						
		4.0	5.0	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0
Largo de barra (b)	cm	4.0	5.0	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0
Ancho de barra (h)	cm	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Corriente nominal (In)	A	646.48	646.48	646.48	646.48	646.48	646.48	646.48
Pérdida por efecto Joule	W/m	17.76	14.21	11.84	10.93	10.15	8.88	7.89
Costo de barra	\$/m	150.00	180.00	216.00	259.20	311.04	373.25	447.90
Número de barras	u	3	3	3	3	3	3	3
Costo total	\$/m	450	540	648	777.6	933.12	1119.74	1343.69
Pérdida de energía en kW/m	kW/m	0.053	0.043	0.036	0.033	0.030	0.027	0.024
Precio de energía en hora pico	\$	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Número de horas pico	h	360	360	360	360	360	360	360
Precio de energía en hora fuera de pico	\$	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Número de horas fuera de pico	h	120	120	120	120	120	120	120
Precio de energía mensual	\$/kWh-mes	1044.00	1044.00	1044.00	1044.00	1044.00	1044.00	1044.00
Costo de energía mensual	\$/m	55.63	44.50	37.09	34.23	31.79	27.82	24.72
Precio de energía adicional mensual	\$/kWh-mes	50	50	50	50	50	50	50
Costo por energía adicional	\$/m	2.66	2.13	1.78	1.64	1.52	1.33	1.18
Costo de pérdidas	\$/m	58.30	46.64	38.86	35.87	33.31	29.15	25.91
Tiempo de vida del proyecto (N)	años	5	5	5	5	5	5	5
Factor de costos (Q)		55.80	55.80	55.80	55.80	55.80	55.80	55.80
Valor actual (PV)	\$/m	3252.90	2602.32	2168.60	2001.79	1858.80	1626.45	1445.73
Costo de inversión (Cinv)	\$/m	1080.00	1040.00	1248.00	1427.60	1633.12	1919.74	2243.69
Costo Total Equivalente	\$/m	4332.90	3642.32	3416.60	3429.39	3491.92	3546.20	3689.43

Cálculos parciales para obtener la barra de tamaño mínimo económico (N=10)

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CÁLCULO DE COSTOS						
		4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
Largo de barra (b)	cm	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
Ancho de barra (h)	cm	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Corriente nominal (In)	A	646.48	646.48	646.48	646.48	646.48	646.48	646.48
Pérdida por efecto Joule	W/m	17.76	14.21	11.84	10.15	8.88	7.89	7.10
Costo de barra	\$/m	150.00	180.00	216.00	259.20	311.04	373.25	447.90
Número de barras	u	3	3	3	3	3	3	3
Costo total	\$/m	450	540	648	777.6	933.12	1119.74	1343.69
Pérdida de energía en kW/m	kW/m	0.053	0.043	0.036	0.030	0.027	0.024	0.021
Precio de energía en hora pico	\$	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Número de horas pico	h	360	360	360	360	360	360	360
Precio de energía en hora fuera de pico	\$	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Número de horas fuera de pico	h	120	120	120	120	120	120	120
Precio de energía mensual	\$/kWh-mes	1044.00	1044.00	1044.00	1044.00	1044.00	1044.00	1044.00
Costo de energía mensual	\$/m	55.63	44.50	37.09	31.79	27.82	24.72	22.25
Precio de energía adicional mensual	\$/kWh-mes	50	50	50	50	50	50	50
Costo por energía adicional	\$/m	2.66	2.13	1.78	1.52	1.33	1.18	1.07
Costo de pérdidas	\$/m	58.30	46.64	38.86	33.31	29.15	25.91	23.32
Tiempo de vida del proyecto (N)	años	10	10	10	10	10	10	10
Factor de costos (Q)		104.10	104.10	104.10	104.10	104.10	104.10	104.10
Valor actual (PV)	\$/m	6068.29	4854.63	4045.53	3467.59	3034.15	2697.02	2427.32
Costo de inversión (Cinv)	\$/m	1080.00	1040.00	1248.00	1477.60	1733.12	2019.74	2343.69
Costo Total Equivalente	\$/m	7148.29	5894.63	5293.53	4945.19	4767.27	4716.76	4771.01

BIBLIOGRAFÍA

1. Conducteurs en aluminium, en cuivre, Normes DIN 43671 1964
2. Asea Brown Boveri, "Switchgear Manual", Tenth edition 1999
3. Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica (IEEE), "Prácticas Recomendadas y Requerimientos para control de armónicas en sistemas de potencia", Estandar IEEE - 519, 1992
4. Copper Development Association, "Electrical Energy Efficiency", CDA Publication 022, January 1997
5. Theodore Wildy, "Maquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia", Edición: 6 Publicado por Pearson Educación, 2007
6. Donald G. Fink, H. Wayne Beaty, John M. Carroll, "Manual práctico de electricidad para ingenieros", Publicado por Reverte, 1984
7. M. Altenhuber, Viena, "Optimal dimensioning of switchgear", Elektropraktiker, Berlin 61 (2007)
8. Jürgen Schlabbach, "Institution of Electrical Engineers", IET, 2005
9. Copper Development Association, "Electrical Energy Efficiency", CDA Publication 116, January 1996
10. Centre d'Information du Cuivre, Laitons et Alliages, "Barres omnibus en cuivre"
11. Gaudencio Zoppetti Júdez, "Estaciones Transformadoras y de Distribución", Editorial Gustavo Pili, S.A. , Cuarta edicion, 1972