

CAPÍTULO 1

INSTALACIONES EN MÉXICO Y OTRAS PARTES DEL MUNDO DE CABLES DE POTENCIA SUBTERRÁNEOS

1.1 Breve historia de los cables de potencia

El cable con aislamiento de papel que daría lugar a una tecnología que había de imperar por muchos años, fue elaborado en 1872 por John H. Wortendyhe, fabricante de papel de Richmond Virginia. Wortendyhe no hizo ningún intento para comercializar su cable a pesar de que era el inventor de una rudimentaria máquina para encantar el aislamiento de papel sobre el conductor. En 1884, Edwin D. McCracken solicitó una patente que cubría: "Un alambre eléctrico con una cubierta consistente de una cinta de papel enrollada a lo largo del conductor, en la que el papel de fibra vegetal hace las veces del aislamiento del cable".

El primer cable de papel impregnado en aceite con una cubierta de plomo extruida, fue un cable telefónico diseñado por John A. Barret de la American Telephone and Telegraph Co. La impregnación de este cable se llevó a cabo por inmersión en aceite caliente con la idea de que el calor eliminaría la humedad por evaporación y el aire por la expansión. Fue J.T. Jacques de Boston, Mas., entonces asociado con la Faraday Electric Cable Co. quien patentó en 1885 un proceso para combinar el secado en vacío con la impregnación en caliente a presión. El año de 1895, marco el comienzo del cable de papel impregnado; cuando varias compañías iniciaron su fabricación. El primer cable aislado de papel de 13 kV fue fabricado por la National Conduit and Cable Co. en 1897 e instalado en Minneapolis y St. Paul, Minn.

Para el año de 1902 el aislamiento de papel estaba completamente establecido como un elemento de uso común en la elaboración de cables aislados. Los primeros cables se impregnaron con una mezcla de aceite con brea seca y madera. Este imprégnate fue reemplazado después de la primera guerra mundial por una mezcla de resina y petróleo. Finalmente a mediados de la década de 1920 se empleo el aceite mineral como imprégnate.

Por ultimo, en la década de los cincuentas se introdujeron en el mercado los cables con aislamiento de polietileno, los que tuvieron una aceptación muy modesta y no fue sino hasta fines de la siguiente década cuando se empezaron a emplear los cables de polietileno de cadena cruzada y posteriormente los de etileno propileno.

1.2 Cables de papel impregnado

Para la transmisión de energía eléctrica a alta tensión por cables subterráneos se ha utilizado cables de papel impregnado de construcción especial; se han elaborado cables para tensiones de operación de hasta 500 kV entre fases.

En los cables con aislamiento de papel impregnado, la variación de la corriente debida a la variación de la carga conectada, produce cambios de temperatura: el conductor se dilata cuando está a temperaturas elevadas, causando una expansión del aislamiento y del forro, los cuales no se contraen totalmente al enfriarse el cable, lo que puede producir pequeños huecos en el dieléctrico; si el gradiente de potencial es suficientemente elevado el gas contenido en esos huecos se ioniza causando el deterioro del aislamiento y finalmente su perforación.

Para evitar este fenómeno de ionización se recurre a los siguientes procedimientos:

En los cables llamados de presión interna de aceite se usa un aceite fluido a presión, contenido en el cable, que llena los huecos que se formen en el aislamiento.

En los cables de presión interna de gas se introduce nitrógeno a presión en el aislamiento.

En los cables de presión externa de nitrógeno o de aceite, la ionización se evita aplicando una presión sobre el aislamiento, comprimiéndolo contra el conductor.

A continuación se describen los tipos más usuales de cables para alta tensión con aislamiento de papel impregnado.

1.2.1 Cables de presión interna de aceite

Constan de un conducto central constituido por una espiral de acero, el conductor de cobre de tipo anular, un papel semiconductor, el aislamiento de papel impregnado, un papel metalizado, un forro de plomo, un fleje de acero inoxidable magnético y una cubierta de yute con asfalto o de cloruro de polivinilo.

El conducto interior del cable va lleno de aceite fluido a presión. Los cables se mantienen bajo presión mediante depósitos de aceite colocados en las terminales y en pozos subterráneos a lo largo del cable. La canalización está dividida en tramos de menos de 2 km. para poder mantener una presión adecuada del aceite.

Para tensiones del orden de 60 kV entre hilos la presión interna del aceite es de 2 a 3 kg/cm². Para tensiones del orden de 230 kV la presión interna de aceite es de 5 kg/cm². Existen en servicio varios cables de 425 kV con una presión interna de aceite de 15 kg/cm².

Este tipo de cable es generalmente monofásico, pero se utilizan a veces cables trifásicos para tensiones de 60 a 90 kV entre hilos.

1.2.2 Cables de presión interna de gas

Son cables trifásicos formados por tres conductores de cobre recubierto cada uno de papel semiconductor, de un aislamiento de papel impregnado y de un papel semiconductor imbricado con una cinta de aluminio, formando una superficie equipotencial. Los tres conductores están cableados con rellenos de yute en los que hay dos tubos de plomo por los que se transmite la presión de nitrógeno. El conjunto de las tres fases está rodeado por un forro de plomo reforzado por dos flejes, uno de paso largo para soportar los esfuerzos longitudinales y otro de paso corto para soportar los esfuerzos transversales. La presión de nitrógeno es de 15 kg/cm². Puede mezclarse con el nitrógeno, hexafloruro de azufre (SF₆), que es un gas con una rigidez dieléctrica dos y media veces mayor que el nitrógeno. Este tipo de cable se usa en tensiones de 60 a 9 kV.

1.2.3 Cables de presión externa de nitrógeno.

Consisten en tres cables monofásicos con aislamiento de papel impregnado, colocados dentro de un tubo de acero, que se llena con nitrógeno a una presión de 15 kg/cm².

Cada cable está formado por el conductor de cobre, de forma oval, un papel semiconductor, el aislamiento de papel impregnado, una superficie equipotencial, un forro de polietileno, una cinta de

cobre y un alambre con sección en forma de semicírculo, enrollado sobre el cable, para facilitar el deslizamiento del cable dentro del tubo.

El diámetro del tubo de acero varía entre 100 y 250 mm, según las dimensiones del cable. El tubo de acero se protege exteriormente de la corrosión recubriéndolo de un compuesto asfáltico o de seda de vidrio impregnada en carboplasto.

1.2.4 Cables de presión externa de aceite

Estos cables son de constitución similar a los anteriores, pero en lugar de llenar el tubo de nitrógeno se llena de aceite aislante a una presión de 15 kg/cm².

Los tres cables monofásicos colocados en el interior del tubo son similares a los descritos en el punto 1.2.3, pero en las instalaciones más recientes no llevan ningún forro, quedando el aislamiento de papel bañado por el aceite del tubo.

1.2.5 Cables con aislamiento gaseoso.

Se ha iniciado el desarrollo de cables con aislamiento gaseoso utilizando hexafluoruro de azufre (SF₆); esta técnica permitiría la realización de cables con gran capacidad de conducción, del orden de 1100 MVA a 362 kV, aunque su competitividad con los cables de aceite fluido y enfriamiento forzado no está todavía demostrada.

Los cables de presión interna de aceite constituyen una solución muy satisfactoria para tramos relativamente cortos. En cambio, en tramos largos o en terrenos accidentados, la necesidad de poner depósitos de aceite intermedios para mantener la presión del aceite, complica la instalación y eleva su costo. En estos casos los cables de presión externa de gas o de aceite constituyen una solución más económica.

La comparación entre cables de presión externa de nitrógeno y de presión externa de aceite en tubos de acero, en un principio se prefirió la primera solución debido a la mayor simplicidad de la instalación de los cables con nitrógeno. Sin embargo, la experiencia en instalaciones en funcionamiento desde hace años y las pruebas de envejecimiento acelerado realizadas en los laboratorios han demostrado que el cable con presión externa de aceite tiene una vida más larga que el de gas. Por otra parte, varias modificaciones hechas al diseño de los cables con presión interna de aceite, como por ejemplo la supresión del forro, han permitido reducir su costo a un valor del mismo orden que el de los cables de presión externa de gas.

1.3 Instalación de cables de potencia en México.

Los cables de energía aislados para tensiones entre 69 y 400 kV cuentan ya con una larga historia en México. Se empezaron a utilizar en los años 50's, por medio de Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Compañía de Luz y Fuerza del Centro (LyFC) principalmente.

En el año de 1950 se instaló el primer circuito subterráneo con una longitud de 5.8 Km utilizando cable de 85 kV del tipo High Pressure Gas Filled (HPGF), fabricado en los E.U. por Phelps Dodge e instalado por LyFC entre las Subestaciones Nonoalco y San Lázaro en la Ciudad de México.

Tabla 1.1- Cables de Energía tipo HPGF de 85 kV instalados por LyFC en la Cd. de México entre 1950 y 1960.

No	Enlace entre subestaciones	Entrada en operación	Tensión nominal (kV)	Área del conductor		Diámetro del tubo		Aislante	Longitud aproximada (km)	No. de circuitos
				KCM	mm2	plg.	mm			
1	NONOALCO - SAN LAZARO	1950	85	500	250	5.1	129)	GAS	5.8	1
2	SAN LAZARO - JAMAICA	1952	85	500	250	5.1	(129)	GAS	3.9	1
3	TACUBAYA - CONDESA	1960	85	700	350	5.1	(129)	GAS	3.5	1
4	CONDESA - NARVARTE	1960	85	700	350	5.1	(129)	GAS	4.5	1
5	NARVARTE - TAXQUEÑA	1960	85	900	450	5.1	(129)	GAS	5.3	2
									23	

En el año de 1966 los primeros circuitos subterráneos con cables tipo (High Pressure Oil Filled) HPOF de 85 kV, enlazan las subestaciones Morales, Verónica, Indianilla y Jamaica de Luz y Fuerza del Centro en la Ciudad de México

Estos cables fueron fabricados (parcialmente) por primera vez en México por Conдумex, con asesoría de Anaconda Wire & Cable Co. el resto del cable, los empalmes, las terminales, el tubo de acero y el aceite fueron importados de E.U.

Tabla 1.2- Cables de Energía tipo HPOF de 85 kV instalados por LyFC en la Cd. de México entre 1966 y 1988.

No	Enlace entre subestaciones	Entrada en operación	Tensión nominal (kV)	Área del conductor		Diámetro del tubo		Aislante	Longitud aproximada (km)	No. de circuitos
				kcm	mm2	plg	(mm)			
1	MORALES - VERONICA	1966	85	1000	500	6.125	(156)	ACEITE	3.7	2
2	VERONICA - INDIANILLA	1966	85	800	400	6.125	(156)	ACEITE	3.3	1
3	INDIANILLA - JAMAICA	1966	85	800	400	6.125	(156)	ACEITE	2.8	1
4	JAMAICA - BUEN TONO (PCC)	1969	85	800	400	6.125	(156)	ACEITE	3.5	1
5	BUEN TONO (PCC) - NONOALCO	1969	85	800	400	6.125	(156)	ACEITE	3.3	1
6	MORALES - HUASTECA	1983	85	1000	500	6.125	(156)	ACEITE	3	1
7	HUASTECA - VERONICA	1983	85	1000	500	6.125	(156)	ACEITE	1	1
8	HUASTECA - PEMEX	1988	85	1000	500	6.125	(156)	ACEITE	0.2	1
9	VERONICA - PEMEX	1988	85	1000	500	6.125	(156)	ACEITE	1	1
									21.8	

En el año de 1975 se instaló el único cable de 115 kV tipo HPOF fabricado e instalado por Conдумex y operado por CFE, entre las subestaciones Veracruz 1 y González Pages, en la Ciudad de Veracruz.

Este circuito consta de dos secciones de aproximadamente 4 km. de longitud, uno con cable de conductor calibre 3/0 AWG y el otro con cable 250 KCM, ambos de cobre; la tubería, el aceite, los empalmes y las terminales fueron importados de E.U. Este circuito fue sustituido por un cable de aislamiento extruido XLPE en el 2005.

Los primeros cables tipo HPOF de 230 kV en México se fabricaron en el año de 1972 por Conдумex y ese mismo año se instalaron en la Ciudad de México tres circuitos: “K-0-Pensador Mexicano”, “Pensador Mexicano - Merced” y “Merced - Jamaica”. El tubo de acero, el aceite y los accesorios (empalmes y terminales) fueron importados de Estados Unidos de América.

La instalación de estos circuitos fue hecha por personal de la Gerencia de Construcción de LyFC, con la supervisión de Conдумex y de Anaconda Wire & Cable Co.

Tabla 1.3- Cables de Energía tipo HPOF de 230kV instalados por LyFC en la Cd. de México entre 1972 y 1990.

No	Enlace entre subestaciones	Entrada en operación	Tensión nominal (kV)	Área del conductor		Diámetro del tubo		Aislante	Longitud aproximada (km)	No. de circuitos
				KCM	mm ²	plg	(mm)			
1	K-O - PENSADOR MEXICANO	1972	230	1000	500	8.125	(206)	ACEITE	2.4	1
2	PENSADOR MEXICANO - MERCED	1972	230	1000	500	8.125	(206)	ACEITE	2.3	1
3	MERCED - JAMAICA	1972	230	1000	500	8.125	(206)	ACEITE	3.9	1
4	CEYLAN - VALLEJO	1977	230	1500	750	8.125	(206)	ACEITE	4.2	2
5	SAN ANGEL - COYOACAN	1979	230	1000	500	8.125	(206)	ACEITE	4	1
6	AZCAPOTZALCO - REMEDIOS	1984	230	1500	750	8.125	(206)	ACEITE	5.1	2
7	MERCED - PERALVILLO	1986	230	1500	750	8.125	(206)	ACEITE	3.7	1
8	JAMAICA - VERTIZ	1987	230	1500	750	8.125	(206)	ACEITE	2.8	2
9	ESMERALDA - PERALVILLO	1988	230	1500	750	8.125	(206)	ACEITE	5.2	2
10	K - O - CUAUHEMOC	1990	230	1500	750	8.125	(206)	ACEITE	2.8	2
									36.4	

En el año de 1974 se instaló el primer y único cable de 115 kV, tipo (Low Pressure Oil Filled) LPOF calibre 1x95 mm² fabricado en México e instalado por Conдумex dentro de la planta de Volkswagen México, en Puebla, contaba con 900 metros de longitud aproximadamente.

Este primer circuito de 115 kV se instaló entre 1974 y 1975. El primer circuito se sustituyó en el 2005 por cables con aislamiento extruido XLPE. El segundo circuito sigue en operación. En 1979 se instaló otro cable igual fabricado por Pirelli en Italia.

Los primeros cables de 400 kV que se instalaron en México fueron de este tipo en el año de 1974. Debido al desarrollo de los Proyectos Hidroeléctricos de la cuenca del Río Grijalva, fue necesario utilizar cables del tipo LPOF de 400kV fabricados por Pirelli en Italia.

Estos cables fueron instalados por personal técnico del mismo fabricante en las Centrales Hidroeléctricas Adolfo López Mateos (Infiernillo 1974), Belisario Domínguez (Angostura 1a etapa 1977 y 2a etapa 1978), y Manuel Moreno Torres (Chicoasén 1a etapa 1982).

Tabla 1.4- Cables de Energía tipo LPOF de 400kV instalados por CFE en Centrales Hidroeléctricas en los Estados de Michoacán y Chiapas.

No	CENTRAL HIDROELÉCTRICA	Entrada en operación	Tensión nominal (kV)	Área del conductor		Medio Aislante	Longitud aproximada (m)	No. de circuitos
				mm2				
1	ADOLFO LOPEZ MATEOS	Dic-74	400	300		DUODECILBENCENO	3,666	2
	(INFIERNILLO)							
2	BELISARIO DOMINGUEZ	Dic-77	400	300		DUODECILBENCENO	1,620	3
	(ANGOSTURA 1a ETAPA)							
3	BELISARIO DOMINGUEZ	Sep-78	400	300		DUODECILBENCENO	1,140	2
	(ANGOSTURA 2a ETAPA)							
4	MANUEL MORENO TORRES	Dic-82	400	400		DUODECILBENCENO	2,775	5
	(CHICOASEN 1a ETAPA)							
							9,201	

En el año de 1975 se instalaron los primeros cables de 69 kV con aislamiento extruido (EPR), por parte de la división Jalisco de la CFE, estas instalaciones contaron con las siguientes características y circuitos:

- 2 circuitos en la Cd. de Guadalajara (uno con cable de Condux y otro con cable de Conductores Monterrey)
- Un enlace entre la Subestación Alameda y un poste de transición en la Glorieta de la Normal. Longitud de 2.7 km.
- Aproximadamente 16,200 m de cable calibre 380 mm² (750 KCM) de Aluminio con aislamiento de EPR
- 27 empalmes tipo Hotsplicer
- 12 terminales de porcelana marca G&W del tipo llenadas en fábrica

Tabla 1.5- Cables de Energía con Aislamiento Extruido de 85 kV instalados por LyFC en la Ciudad de México entre 1988 y 2002.

No	Enlace entre subestaciones	Entrada en operación	Tensión nominal (kV)	Área del conductor		Aislante	Longitud aproximada (km)	No. de circuitos
				KCM	mm2			
1	MORALES - COLGATE PALMOLIVE	1998	85	1000	500	XLPE	0.8	1
2	MORALES - INDUSTRIA SEDENA	1993	85	750	380	XLPE	2.6	2
3	JAMAICA - VERONICA	2000	85	1600	800	XLPE	7	2
4	HUASTECA - CERVECERIA MODELO	2001	85	800	400	XLPE	1	1
5	PATERA - NACEL	2002	85	800	400	XLPE	1.5	1
							12.9	

El primer cable de 115 kV de Aislamiento Extruido se instaló en México en el año de 1980, siendo el primer cable de este tipo instalado por la CFE en el país, contaba con 2 km. de longitud aproximadamente. Enlaza las Subestaciones González Pagés y Playa Norte, en el puerto de Veracruz, con cable calibre 500 KCM de aluminio con aislamiento XLPE.

El cable fue fabricado por Conelec, e instalado en ductos subterráneos por personal técnico de la CFE, se utilizaron empalmes premoldeados marca Elastimold y terminales G&W.

Tabla 1.6- Cables de Energía con Aislamiento Extruido de 230kV instalados por LyFC en la Ciudad de México entre 1993 y 2004.

No	Enlace entre subestaciones	Entrada en operación	Tensión nominal (kV)	Área del conductor		Aislante	Longitud aproximada (km)	No. de circuitos
				KCM	Mm2			
1	ESTRELLA - SANTA CRUZ	1993	230	1000 (AL)	500 (AL)	LDPE-PB(SILEC)	6.5	1
2	ESTRELLA - IZTAPALAPA	1993	230	1000 (AL)	500 (AL)	LDPE-PB(SILEC)	5.9	1
3	TECAMACHALCO - BOSQUES	1994	230	1600 (AL)	800 (AL)	LDPE-PB(SILEC)	1.5	2
4	MERCED - OCEANIA	1999	230	1000 (AL)	500 (AL)	HDPE-PB(PIRELLI)	2	1
5	PERALVILLO - OCEANIA	1999	230	1000 (AL)	500 (AL)	HDPE-PB(PIRELLI)	5	1
							23.6	

Tabla 1.7- Resumen de Cables de Energía de Alta Tensión Operados por CFE (longitudes en metros y %)

DIVISION	Tensión de operación entre fases (kV)						TOTAL
	69	115	138	161	230	400	
ORIENTE		49,321					49,321
JALISCO	19,353	8,792			29,400		57,545
PENINSULAR		211,302					211,302
GOLFO NORTE		52,964	7,200				60,164
BAJA CALIFORNIA	18,904			13,200			32,104
BAJIO							
NOROESTE		26,628					26,628
CENTRO SUR		10,040			76,800		86,840
CENTRO ORIENTE		48,678					48,678
CENTRO OCCIDENTE						3,666	3,666
NORTE							
SURESTE						5,535	5,535
GOLFO CENTRO		12,348					12,348
EN CONSTRUCCION			7,500	24,000	44,000		75,500
NACIONAL	38,257	420,073	14,700	37,200	150,200	9,201	669,631
PORCENTAJE APROX.	6%	63%	2%	6%	22%	1%	100%

Como se puede apreciar, la evolución del cable de potencia, ha contribuido en ampliar los campos de aplicación, la Ciudad de México no es la excepción teniendo cables de hasta 230 kV, la tecnología

actual permite instalar cables de hasta 400 kV con aislamiento de XLPE que es más competitivo respecto a la primera generación de cables con recubrimientos de papel.

1.4 Instalación de cables de Extra Alta Tensión en el mundo.

El cambio tecnológico en la construcción de cables de potencia, ha dado lugar a que muchos proyectos de transmisión y distribución se diseñen y ejecuten como sistemas subterráneos. El sistema aéreo tradicional en alta y extra alta tensión, es el medio con el que varias ciudades importantes en el mundo son suministradas de energía, sin embargo, por la reducción de espacios ya no toleran el crecimiento en la capacidad de transmitir potencia por la demanda energética con este sistema, los sistemas de cable de potencia subterráneos, con un adecuado diseño pueden ser la respuesta a las necesidades de transmisión en zonas altamente pobladas.

En la Figura 1.1 se pone de manifiesto la tasa de sistemas subterráneos de líneas eléctricas de potencia, recogida por un grupo de especialistas del CIGRE (Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas), en 2007; se puede constatar un decrecimiento de la tasa de sistemas subterráneos a medida que sube el nivel de tensión, hasta valores de algunas décimas por ciento para los cables del nivel de tensión que nos interesa (400 kV).

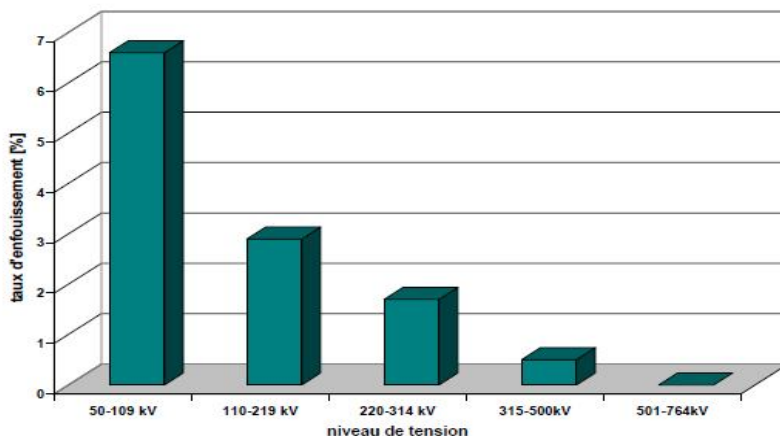


Figura 1.1 Tasa de sistemas subterráneos de las líneas en función del nivel de tensión, para los principales países industrializados (fuente CIGRE 2007)

El dimensionamiento y escala de los proyectos están en función de los requerimientos específicos de cada país, Europa al ser un área altamente poblada e industrializada, los consumos energéticos fuerzan a los sistemas eléctricos a interconectarse y modernizarse. La tecnología de los cables de potencia esta ampliamente probada en Europa. Países desarrollados como Japón, también tienen la necesidad de implementar cables de potencia, por la reducción de espacios, aunque en Japón, se tiene la capacidad de fabricar e implementar cables de hasta 500 kV bajo sus propias normas. A continuación se presenta en las tablas 1.8 y 1.9 Los proyectos que se han realizado en el mundo, indicando las características más relevantes como son tipo de conductor, sección de área transversal del conductor, tipo de empalme, longitud, tipo de instalación y capacidad de transmitir potencia.

Tabla 1.8 Principales proyectos en Extra Alta Tensión en el mundo.

País (ciudad)	Tensión Nominal	Tipo de Empalme (A)	Número de empalmes	Número de Terminales Para exteriores/ SF6	Tipo de Instalación (B)	Longitud	Número De circuitos	Sección transversal Del conductor/ Capacidad de Transmisión (Invierno)	Puesta en servicio
	kV					Km		(mm² / MVA)	
Dinamarca (Copenhague: Southern cable Route)	400	CPFJ	72	3 / 3	DB	22	1	1600 Cu/975	1997
Dinamarca (Copenhague: Northern cable Route)	400	PMJ	42	3 / 3	DB	12	1	1600 Cu/800	1999
Alemania (Berlin/BEWAN G Mitte-Friedrichshain)	400	CPFJ+PMJ	48	0 / 12 (sistema doble)	T	6.3	2	1600 Cu/1100	1998
Alemania (Berlin/BEWAN G Friedrichshain-Marzahn)	400	CPFJ+PMJ	30	0 / 12 (sistema doble)	T	5.5	2	1600 Cu/1100	2000
Japon (Tokio) (C)	500	EMJ	264	0 / 12	T	39.8	2	2500 Cu/2400 (D)	2000
Emiratos Árabes Unidos (Abu Dhabi)	400	PMJ	12	12 / 12	DB&D	1.3 (E)	4	800 Cu/no disponible	2000
España (Madrid)	400	CPFJ+PMJ	96	12 / 0	T	12.8	2	2500 Cu/1720	2004
Dinamarca (Jutland)	400	PMJ	96	36 / 0	DB&D	14.5	2	1200 Al/1200	2004
Reino Unido (London)	400	CPJF	60	0 / 6	T	20	1	2500 Cu/1600	2005
Holanda (Róterdam)	400	PMJ	3	6 / 0	DB&D	2.25	1	1600 Cu/1000	2005
Austria (Wienstrom)	380	PMJ	30	6 / 6	DB&T&M	5.2	2	1200 Cu/1400	2005
Italia (Milan)	380	PMJ	66	12 / 0		8.4	2	2000 Cu/2100	2006

A. **CPJF** = empalme premoldeado de composite.

B. **T**= Túnel, **DB** = Directamente enterrado, **D** = Ductos y trincheras

C. Sistema de cable precalificado siguiendo especificaciones japonesas

D. 900 MVA/circuito actual, 1200 MVA / con ventilación forzada en el futuro.

E. 15 Km. / 4 circuitos x 3 fases = 1.3 Km.

Tabla 1.9 Criterios de diseño adoptados en los proyectos de 400 kV

Proyecto	Cable	Longitud Del Cable Km	Conductor	Rigidez Eléctrica kV/mm	Pantalla metálica	Cubierta	Empalmes	Terminales	Tipo de instalación
Berlín	A	35	1600 mm ² Cu 5 segmentos	11.5/5.4	Alambres de Cu y lamina Al	PE con barniz retardante al fuego	39 pre-fabricados Composite	12 GIS	Túnel + ventilación forzada
	B	16	1600 mm ² Cu 5 segmentos	12.5/6.2	Alambres de Cu y lamina Al	PE con barniz retardante al fuego	15 pre-moldeados, una pieza	6 GIS	Túnel + ventilación forzada
	C	19	1600 mm ² Cu 6 segmentos	12.5/6.2	Aluminio corrugado	PE con barniz retardante al fuego	24 pre-Moldeados, una pieza	6 GIS	Túnel + ventilación forzada
Copenhagen		104	1600 mm ² Cu keystone	11.5/4.9	Plomo extruido	PE con capa semi conductor	72 pre-fabricados composite 42 pre-moldeados, una pieza	24 GIS 12 para exteriores de porcelana	Directamente enterrado
Madrid	A	39	2500 mm ² Cu 6 segmentos	11.6/6.5	Alambres de Cu y lamina Al	PE con capa retardante al fuego	48 pre-fabricados Composite	6 para exteriores de porcelana	Túnel + ventilación forzada
	B	39	2500 mm ² Cu 6 segmentos	12.5/7.2	Lamina de aluminio soldado	PE retardante al fuego	48 pre-moldeados, una pieza	6 para exteriores de porcelana	Túnel + ventilación forzada
Londres		60	2500 mm ² Cu 6 segmentos	11.6/6.5	Alambres de Cu y lamina Al	PE con capa retardante al fuego	60 pre-fabricados Composite	6 GIS	Túnel + ventilación forzada
Jutland		84	1200 mm ² Al Stranded	12.6/6	Alambres De al y al soldado	PE con capa semi conductor	96 pre-moldeados, una pieza	36 para exteriores de composite	Directamente enterrado y ductos
Rotterdam		13.5	1600 mm ² Cu	11.8/5.9	Plomo extruido	PE	6 re-moldeados, una pieza	12 para exteriores de composite	Directamente enterrados + tubos
Viena		31.2	1200 mm ² Cu 5 segmentos	12.1/5.7	Alambres de Cu más lamina Al soldado	PE	66 pre-moldeados una pieza	6 para exteriores de porcelana + 6 en SF6	Directamente enterrados + enfriamiento lateral
Turbigo-Rho		50.9	2000 mm ² Cu 6 segmentos	11.8/6.4	Aluminio soldado	PE	66 pre-moldeados. Una pieza	12 para exteriores de porcelana	Directamente enterrados + ductos

Como se puede observar, en los últimos 25 años, los cables de aislamiento XLPE han sido utilizados para la instalación de cables de potencia en tensiones de hasta 500 kV, la variable que afecta a cada tipo de proyecto, es la obra civil asociada al tipo de instalación. Vemos que para sistemas de más 5 Km. y de gran potencia a 400 kV, los túneles o galerías son las opciones más utilizadas. Como parte de las mejoras en el desempeño de los sistemas de cable subterráneo, se puede incluir un sistema de ventilación forzada, para mantener el cable a temperaturas de operación adecuadas en caso de que se incremente la demanda de energía o las condiciones ambientales sean adversas.

1.5 Proyecto de Barajas, España.

Las autoridades aeroportuarias españolas lanzaron un gran proyecto para realizar la ampliación del aeropuerto de Barajas en Madrid, España.

En el proyecto se ha previsto, entre otros, la construcción de dos nuevas pistas de aterrizaje y un nuevo edificio en la terminal aérea. Cada una de las nuevas pistas de aterrizaje tiene una longitud de 3,5 km. Este gran frente de obra afecta a una serie de infraestructuras existentes, entre las que destaca una línea aérea de doble circuito en 400 kV con una potencia de 1720 MVA por línea, fue necesario sustituir por cable subterráneo dicha línea para evitar dificultades en las operaciones de aterrizaje y despegue de los aviones.

Para realizar el proyecto se analizaron distintas opciones, optando al final por el sistema de cable de potencia subterráneo.

La ruta parte, con dos líneas aéreas de San Sebastian de los Reyes a Morata (35 Km.) y San Sebastian de los Reyes a Loeches (25 Km.) Ver figura. 1.2

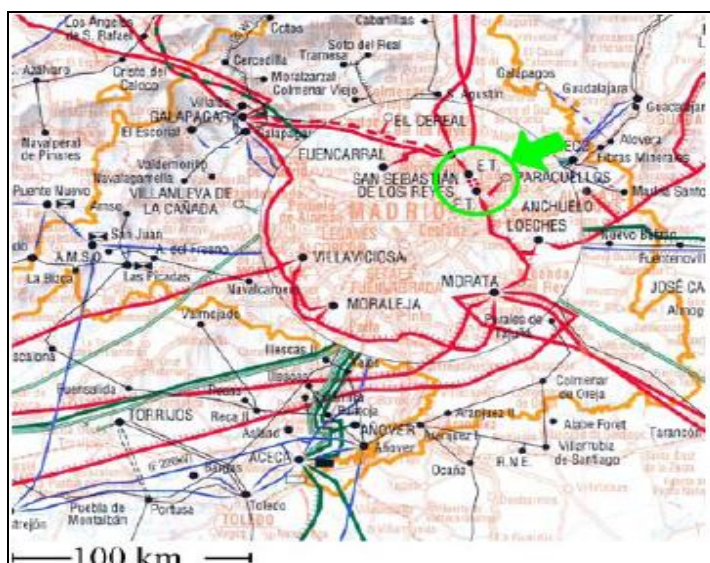


Figura 1.2 Localización de la líneas aéreas a sustituir por cable subterráneo

En esta parte, la línea aérea ha sido substituido por un circuito doble con cable de potencia, el enlace es de 12.8 Km. Los seis cables monopolares del doble circuito están instalados en un mismo túnel con la posibilidad de enfriamiento forzado con aire. El doble circuito no esta eléctricamente en paralelo. En la tabla 2.10 se muestran las características de los cables de potencia monopolares.

Tabla 1.10 Características del cable de potencia.

Fabricante	ABB	PIRELLI
Sección transversal del conductor	2500 mm ²	2500 mm ²
Diámetro del conductor tipo Milliken 6 segmentos	65 mm	65 mm
Diámetro de capa semiconductora	70 mm	71.6 mm
Diámetro aislamiento XLPE	125.9 mm	122 mm
Diámetro capa semiconductora	129.7 mm	126 mm
Diámetro Barrera de agua	-	128.3 mm
Diámetro Pantalla de Aluminio	-	138.8 mm
Diámetro Alambres de cobre + envoltura de aluminio	130.9 mm	-
Diámetro cubierta de PE	148 mm	142.5 mm
Masa del cable	37 kg/m	40 kg/m
Longitud de cable por bobina	810 m	
Número de bobinas	90	
Peso de la bobina	3500 kg	
Dimensiones de la bobina	Diámetro = 4.4 m Ancho = 3 m	

Cada circuito de cable contiene 48 empalmes premoldeados y aterrizados, seis terminales para exteriores más todo el cable requerido para el aterrizamiento de pantallas en cross-bonding (en el capítulo 4, tema 4.11 se explica este método) y conexión de los limitadores de tensión. Los empalmes suministrados por ABB están equipados con sensores capacitivos, para la medición de descargas parciales. Adicionalmente, transformadores de corriente y apartarrayos son instalados para la protección del cable.

El aterrizamiento de las pantallas consiste en una combinación de 5 x 3 secciones menores de cross-bonding (cada 810 metros se hace un intercambio de fases) y dos secciones de aterrizamiento en un solo punto de 300 y 400 metros de longitud. En la figura 1.3 se ilustra el modo de conexión de las pantallas metálicas, las secciones mayores llevan una transposición de fases a cada tercio de la longitud de cada sección y aterrizamiento de las pantallas al final de cada sección. En el capítulo 4.11 se explicará con más detalle este tipo de conexión de las pantallas.

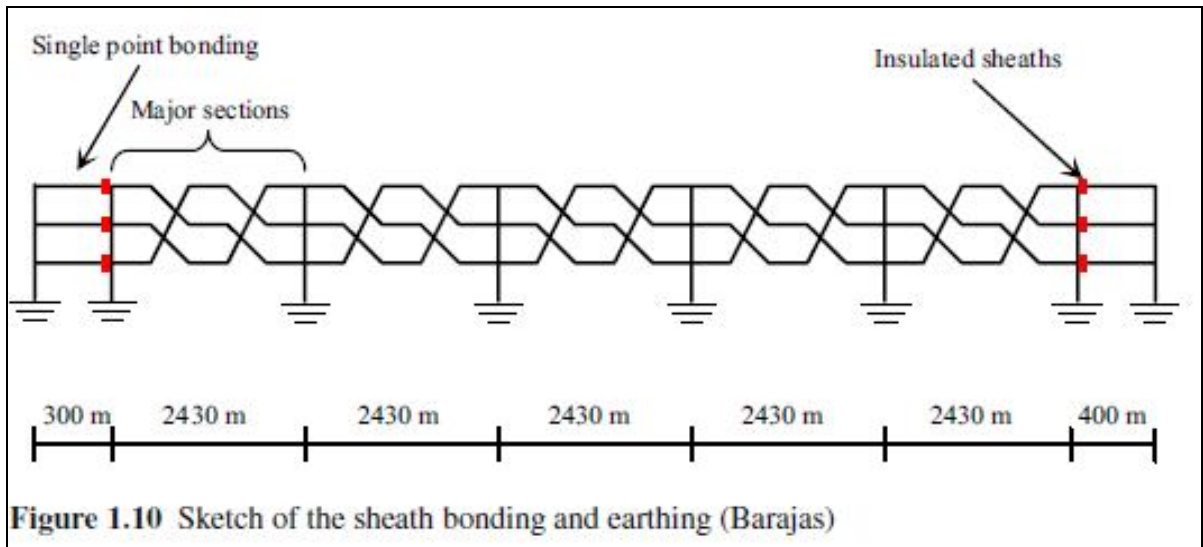


Figura 1.3 Secciones y aterrizamiento de las pantallas.

1.5.1 Características del túnel y sistema de aterrizamiento.

El túnel está enterrado a una profundidad de 2 metros, en una parte de la ruta, corre paralelamente a un río, por lo que bombas de desalaje (251 litros/s) han sido instaladas en caso de emergencia por inundación. Ver figura 1.4

El túnel se construyó con 6500 cajones pre-armados de concreto reforzado con medidas internas de 2 metros de ancho por 2.25 metros de alto y un espesor de paredes de 250 mm.



Figura 1.4

Para la red de tierras, el acero de refuerzo en las galerías no se usa; se prefirió una formación de 4 conductores de cobre (120 mm² y 35 mm²) localizados en los vértices del túnel; un anillo metálico une los 4 conductores de tierra en intervalos regulares de 400 metros.

El túnel ha sido ampliamente equipado, con sistema cerrado de cámaras, detectores de humo y sistema telefónico, para mantenimiento e inspección.

Los cables están instalados en forma vertical, soportados y sujetos cada 6 metros, en esta separación se forma una holgura de 25 cm. La separación entre los circuitos es de 1.44 metros. (Ver Figura 1.5). Cada cable de cada circuito se encuentra separado verticalmente 50 cm. (Ver figura 1.6)

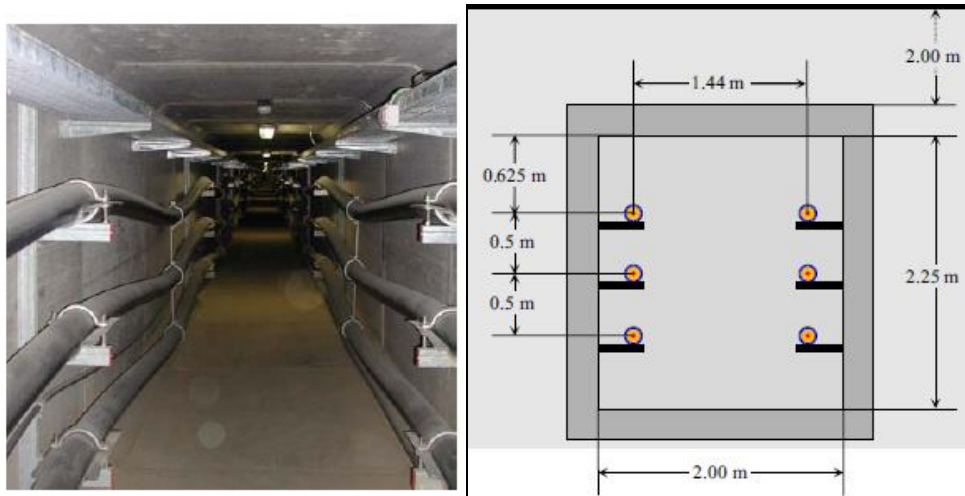


Figura 1.5

Para soportar los esfuerzos mecánicos y eléctricos en caso de corto circuito, se instalaron espaciadores en las 3 fases. Para la ventilación forzada (proyecto de Pirelli), se encuentran localizadas cada 2480 metros, estaciones de ventilación, cada estación esta equipada con tres ventiladores (38.3 kW) con una velocidad máxima de 5 (m/s). Ver figura 1.7

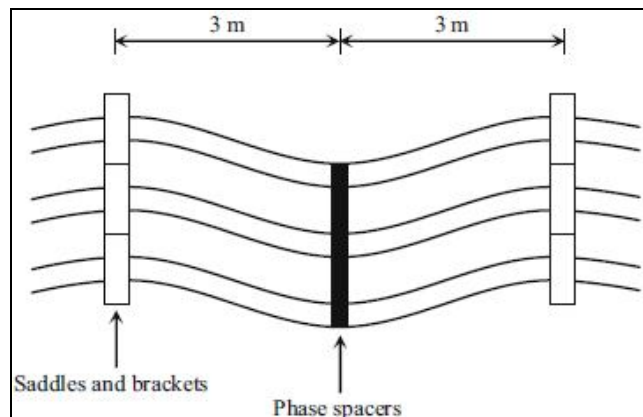


Figura 1.6

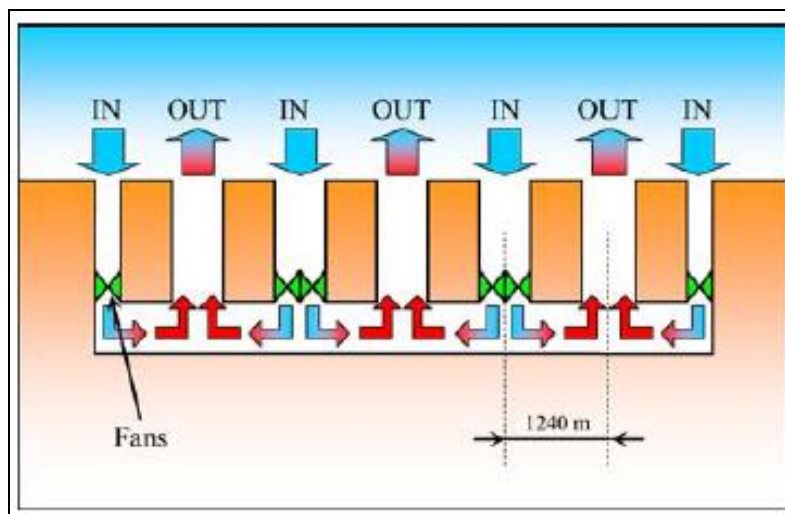


Figura 1.7

El control de la temperatura, lo maneja el sistema RTTR (Real-Time Thermal Rating)

Se cuenta con dos sitios de transición, que cubren un área de 60 x 40 [m²], sin desconectores o interruptores, solamente las terminales de aceite y apartarrays.

Las terminales externas fueron suministradas por dos fabricantes, seis apartarrays son de ABB. Los transformadores de corriente y los relevadores diferenciales son del tipo toroidal.

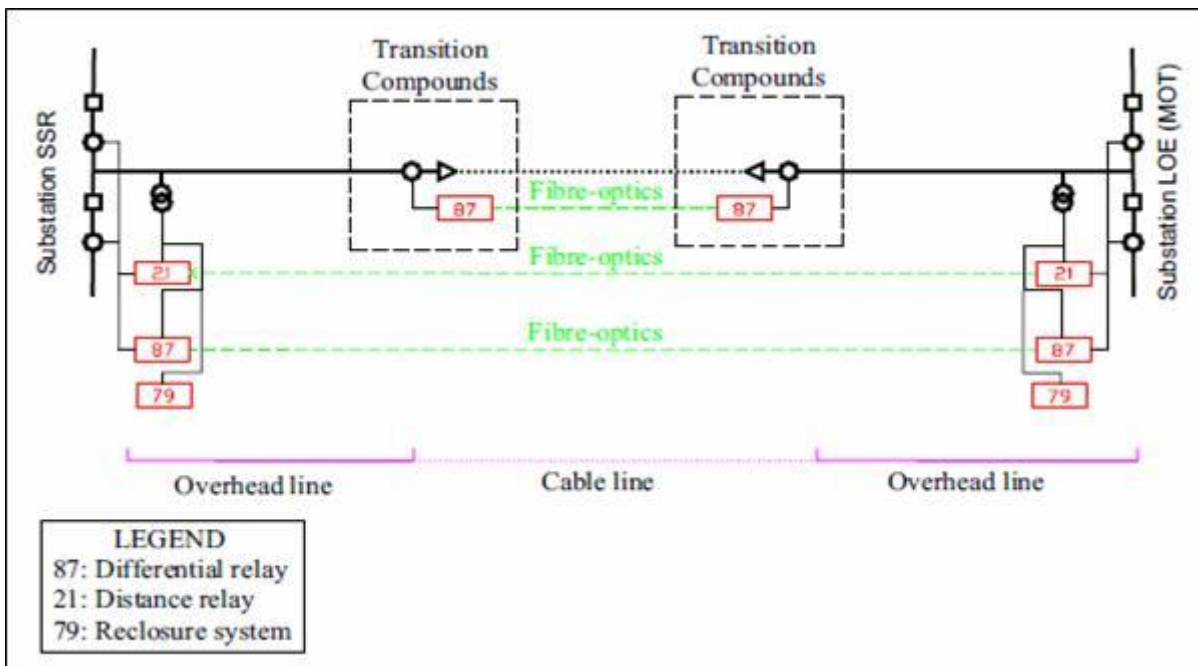


Figura 1.7 Protección diferencial para el tramo de cable (1 circuito).

La estación de transición, tiene una única red de tierra (diseñada para una corriente de corto circuito de 50 kA), además de una planta de emergencia a diesel de 250 [kVA] para las estaciones de ventilación forzada. El esquema de protección diferencial es el que protege al cable, además de las protecciones de la línea aérea. Ver figura 1.7

Las características mas sobresalientes del sistema ya instalado y funcionando, se muestran en la tabla 1.11

Tabla 1.11 Características de Instalación. Barajas, España.

Tensión máxima de operación	Um	420 kV
Tensión fase-fase (nominal)	Un	400 kV
Tensión fase-tierra	Uo	230 kV
Intensidad cortocircuito		50 kA/0.5 s
Longitud de la línea		12.8 Km
Ampacidad	Invierno	2 x 2482 MVA
Capacidad de transmisión a 400 kV	Invierno	2 x 1720 MVA

Pérdidas por efecto Joule en el circuito doble	Invierno	448.6 W/m
Ampacidad	Verano	2 x 2006 A
Capacidad de transmisión a 400 kV	Verano	2 x 1390 MVA
Pérdidas por efecto Joule en el circuito doble	Verano	294.7 W/m
Temperatura máxima en el Interior del túnel	Verano	+ 42 °C
	Invierno	+ 25 °C
Temperatura máxima en el Interior del túnel		+50 °C
Velocidad máxima del aire para Ventilación		5 m/s

1.6 Proyecto de Londres.

La demanda de energía eléctrica sigue aumentando en todo el Reino Unido, pero la tasa de crecimiento en la ciudad de Londres está en torno al doble de la media nacional. Algunas estimaciones indican que el crecimiento se mantendrá durante al menos otros 10 años. Para garantizar el futuro del suministro eléctrico de Londres, National Grid ha invertido desde 1990 más de 1.000 millones de euros (1.270 millones de dólares) en reforzar la red de transmisión en Londres y zona metropolitana, lo que representa aproximadamente el 20 por ciento de las inversiones totales de National Grid en toda Inglaterra y País de Gales.

Una de las medidas adoptadas por National Grid fue la adjudicación a ABB de un proyecto llave en mano con una duración prevista de tres años, que debía estar finalizado en verano de 2005 Figura 1.8. El proyecto tiene por objeto crear 'London Connection' para satisfacer la demanda de electricidad de la capital y de la zona noroeste de Londres.

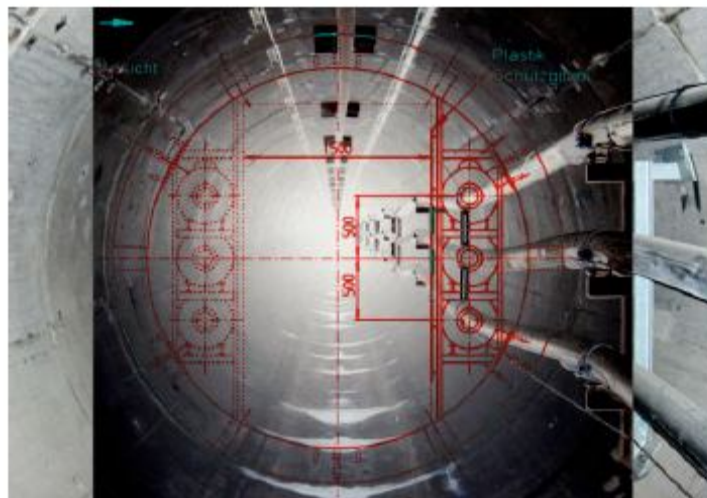


Fig. 2 The tunnel profile with the installed cable

Figura 1.8

El sistema se encuentra tendido en un túnel de tres metros de diámetro y 20 km de longitud, el cable enlaza una subestación ampliada en Elstree con una subestación construida por ABB en St John's

Wood. Este ha sido el proyecto de construcción de túneles más importante de National Grid. La conexión de Londres, 'London Connection', utiliza tecnología avanzada XLPE de aislamiento de polietileno reticulado, que apenas requiere mantenimiento y es hoy por hoy el cable subterráneo XLPE de 400 kV más largo de Europa. Ver Figura 1.9

Para el proyecto de Londres, ABB instaló, probó y puso en servicio 61 km de cable de 150 mm de diámetro, con un peso total de 2440 toneladas, que se suministró en 63 grandes bobinas. La subestación de St John's Wood Además de satisfacer la demanda energética siempre creciente de la capital, era necesario modernizar la subestación de St John's Wood, del oeste de Londres, para hacer frente al incremento de demanda local. Por consiguiente, National Grid decidió construir una nueva subestación en St John's Wood. Aunque en esta ubicación había existido una central eléctrica, había muy poco espacio disponible; el suelo es muy escaso en esta parte de Londres y no existía la posibilidad de adquirir más terrenos. Ver Figura 1.10

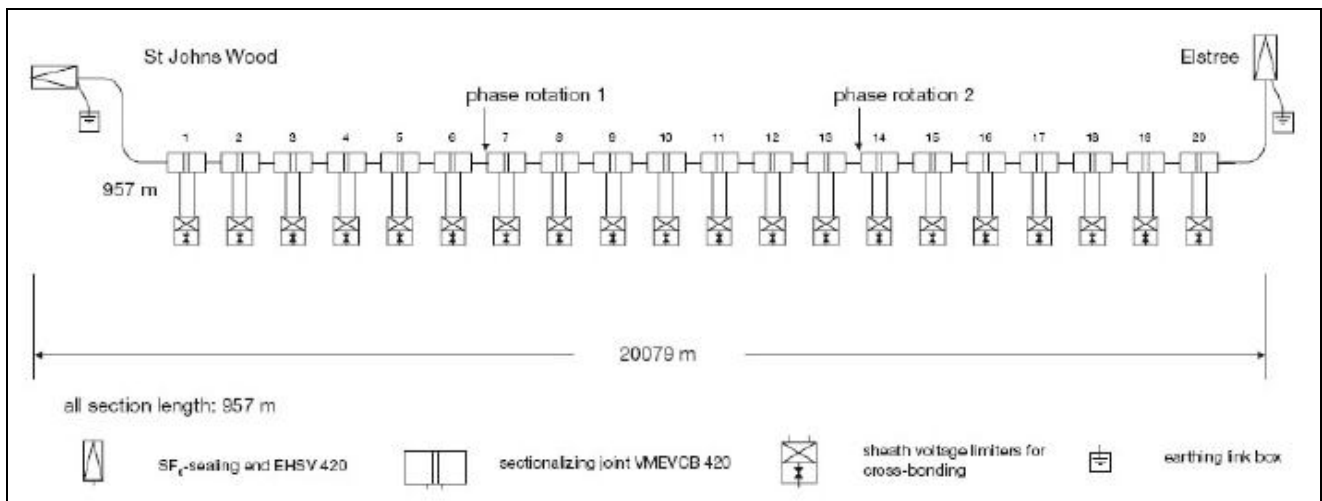


Figura 1.9 Sistema de conexión de pantalla metálica a lo largo del circuito 20 Km.

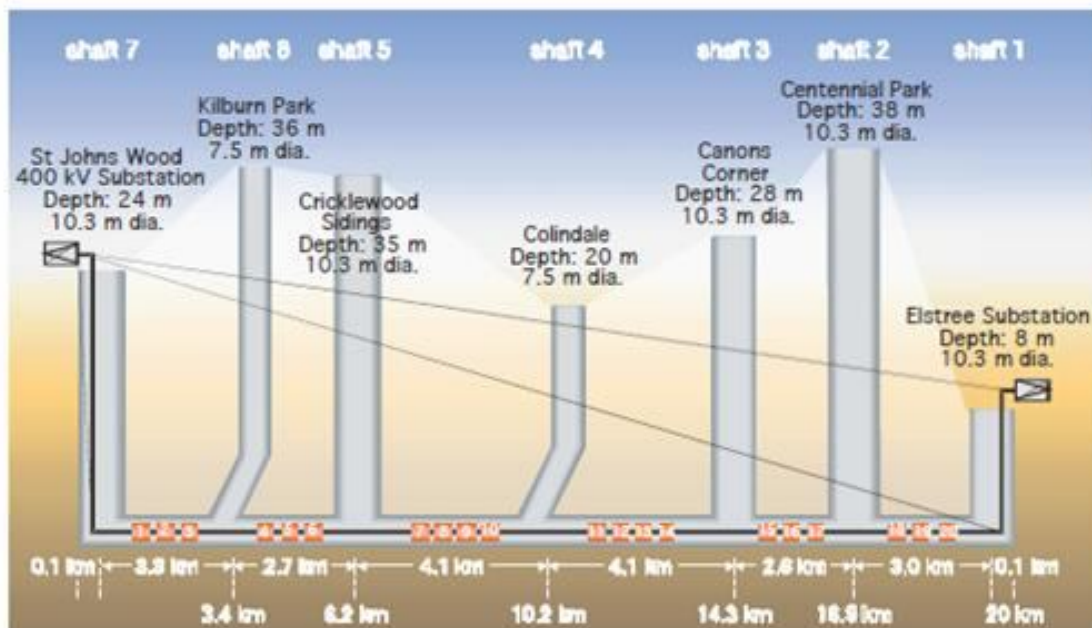


Figura 1.10 Ubicación y profundidad de las subestaciones y túnel.

1.7 Diagrama de flujo para la implementación de un sistema de cable subterráneo.

En general, cada proyecto tiene características únicas, estas obedecen a los requerimientos del sistema y el lugar donde se contemple llevar a cabo el proyecto. La complejidad de cada proyecto estriba principalmente en la obra civil, existen recomendaciones o reglamentos del tipo de obra civil, aunque no siempre se puedan cumplir, se busca garantizar la seguridad de los cables de potencia; desde el punto de vista eléctrico, el cable de potencia y sus accesorios cumplen con las normas y estándares nacionales e internacionales que se especifiquen en cada proyecto. Para el caso de México, al ser proyectos tipo “llave en mano”, los fabricantes de los cables o de quien sea la responsabilidad de la instalación, debe garantizar por medio de pruebas de laboratorio para los materiales constituyentes del cable y de campo para verificar la correcta instalación.

A continuación se ilustra el proceso que debe tomarse en cuenta para el diseño de un sistema de cable subterráneo, donde a partir de las especificaciones del cliente, se van determinando las características técnicas y optimizando para cada proyecto.

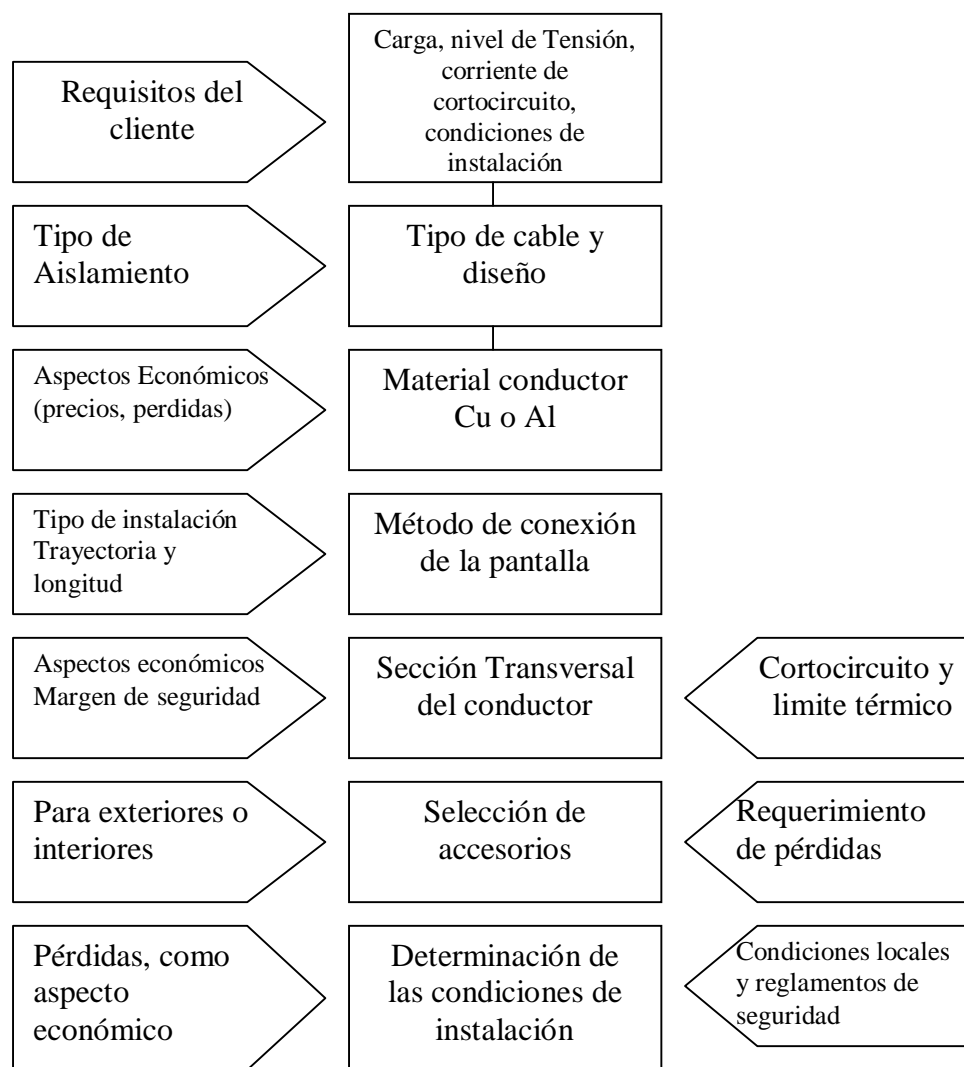


Figura 1.11 Diagrama de flujo para el diseño de un sistema de cable de potencia subterráneo.