

GMC INSTRUMENTS

Modelo Neher-McGrath considerando corrientes armónicas y altas frecuencias

Cálculo de la capacidad de conducción de corriente
en cables eléctricos

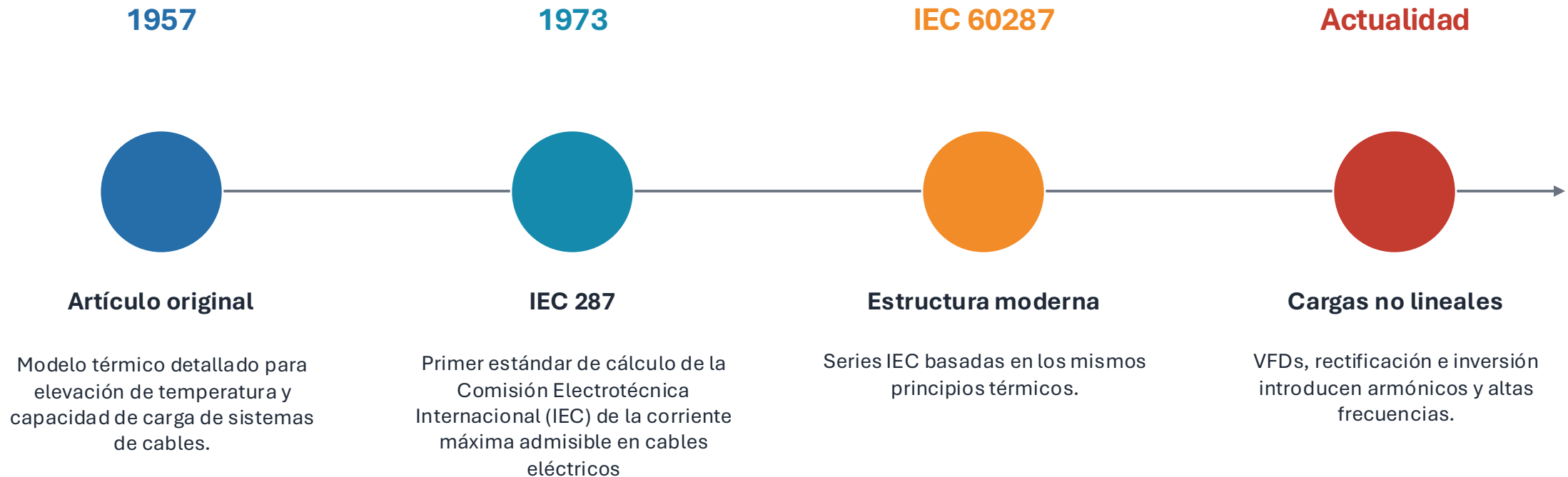


EFICIENCIA ENERGÉTICA = AHORRO DE ENERGÍA + CALIDAD DE LA POTENCIA

¿En qué consiste el artículo “Neher-McGrath”?

- Es un artículo publicado en 1957 por J. H. Neher - M. H. McGrath "The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems", AIEE Transactions, Part III, Volume 76, pp 752-772, October, 1957 **para el cálculo de la capacidad de conducción de corriente de cables eléctricos**
- Por primera vez, se contaba con un modelo matemático estructurado para calcular la corriente máxima admisible en conductores eléctricos aislados, en instalaciones al aire o instalaciones subterráneas

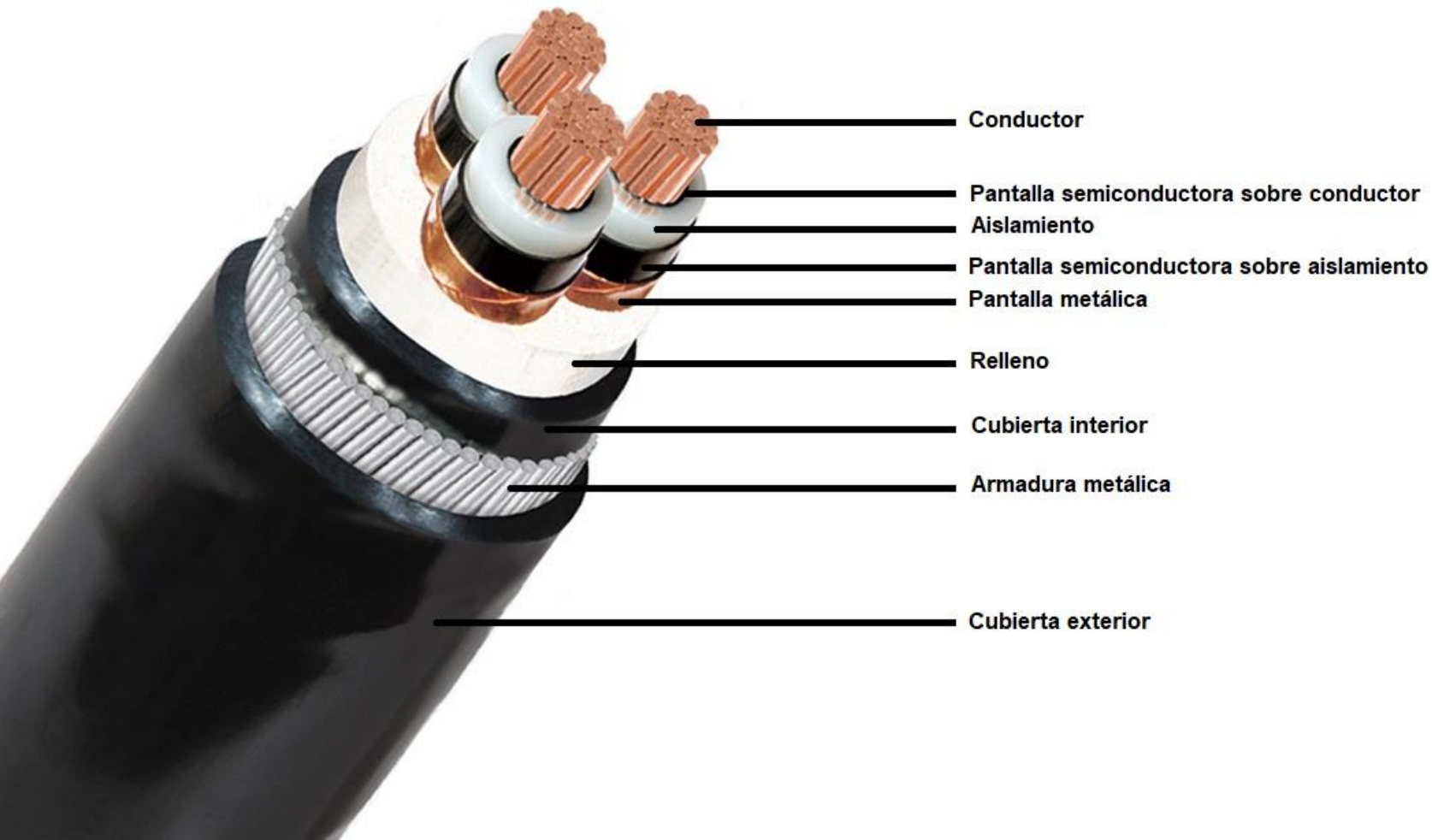
Neher-McGrath: el punto de partida



Limitación histórica

- Los métodos originales consideran pérdidas a la frecuencia fundamental, típicamente a 50 Hz o 60 Hz
- Este artículo propone extender el balance térmico para incorporar corrientes armónicas

COMPONENTES DE UN CABLE AISLADO DE POTENCIA



FLUJO DE CALOR:

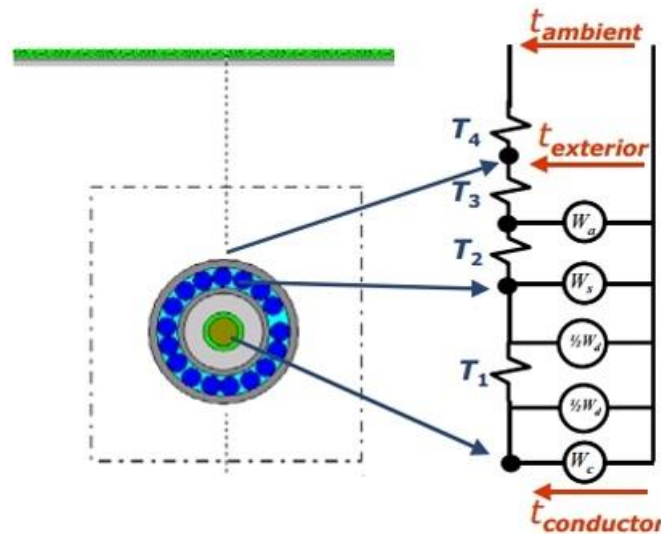
Desde las fuentes de calor (conductor, aislamiento, pantallas/armaduras metálicas, ductos metálicos) hacia el medio ambiente exterior



CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN DE CORRIENTE = FENÓMENO ELÉCTRICO ASOCIADO CON TRANSFERENCIA DE CALOR

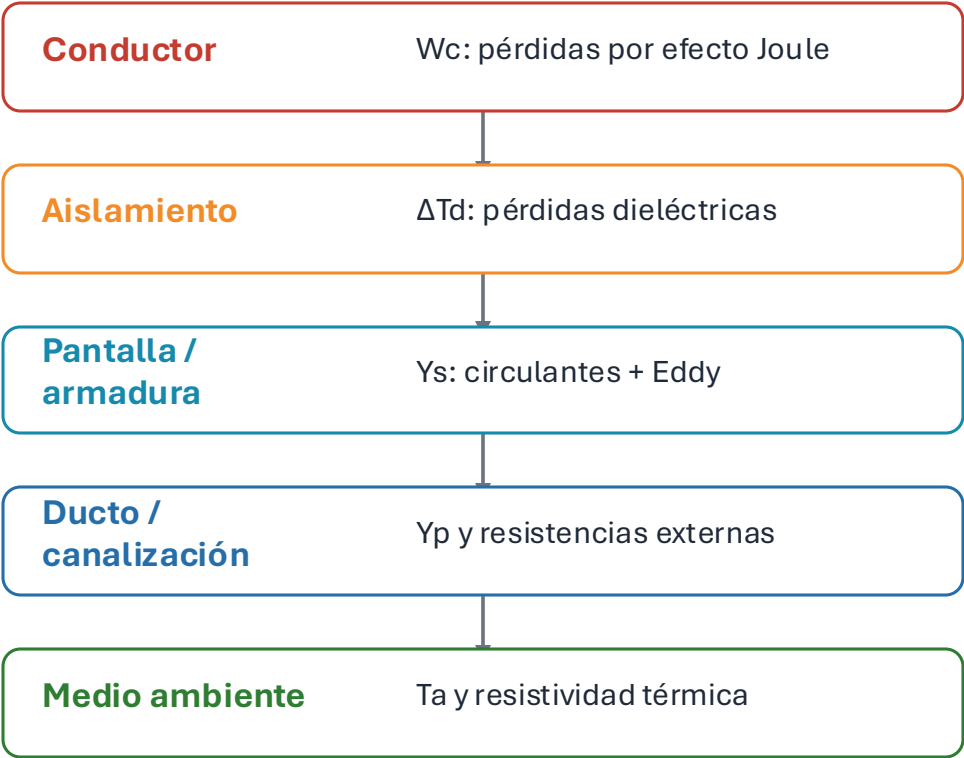
$$\Delta T_c = W_c \Sigma \bar{R}_{tc} + W_d \Sigma \bar{R}_{td} + W_s \Sigma \bar{R}_{ts} + W_p \Sigma \bar{R}_{tp} \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_c - T_a = I^2 R_{dc} (1 + Y_c) \Sigma \bar{R}_{tc} + W_d \Sigma \bar{R}_{td} + I^2 R_{dc} Y_s \Sigma \bar{R}_{ts} + I^2 R_{dc} Y_p \Sigma \bar{R}_{tp} \quad ^\circ\text{C}$$



Modelo térmico: del conductor al ambiente

Idea central
El modelo no calcula “corriente” directamente: calcula cuánto calor puede disiparse sin que el conductor exceda la temperatura máxima permitida por el aislamiento, típicamente en estado estable, y en ciertas ocasiones, para condiciones de sobrecarga



Rca'
Representa la resistencia térmica efectiva total entre el conductor y el medio ambiente. Cambia con instalación, ductos, suelo y condiciones de disipación.

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1 + Y_c)\bar{R}_{ca}'}} \quad \text{Amperes} \quad \text{(a la frecuencia fundamental)}$$

Donde:

T_c = Temperatura de operación del conductor (°C)

T_a = Temperatura ambiente (°C)

ΔT_d = Incremento de temperatura en el aislamiento por pérdidas en el dieléctrico (°C)

R_{dc} = Resistencia eléctrica en dc a la temperatura de operación del conductor T_c (W/m)

Y_c = Incremento de pérdidas generadas en el conductor debido al efecto piel y al efecto proximidad **A LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL**

$\bar{R}_{ca}'$ = Resistencia térmica efectiva entre el conductor y el medio ambiente (°C-m/W)

$$= \bar{R}_i + q_s \bar{R}_{se} + q_e \bar{R}_e$$

$\bar{R}_i'$ = Resistencia térmica del aislamiento (°C-m/W)

q_s = **Cociente de la suma de las pérdidas en los conductores mas las pérdidas en las pantallas metálicas entre las pérdidas en los conductores**

$\bar{R}_{se}$ = Resistencia térmica total entre las pantallas metálicas y el medio exterior al cable (°C-m/W)

q_e = **Cociente de la suma de las pérdidas en los conductores mas las pérdidas en las pantallas metálicas mas las pérdidas en los ductos metálicos entre las pérdidas en los conductores (cuando aplique)**

$\bar{R}_e$ = Resistencia térmica total entre los ductos metálicos y el medio ambiente (cuando aplique)

PÉRDIDAS EN PANTALLAS Y CUBIERTAS METÁLICAS/DUCTOS METÁLICOS:

$$q_s = 1 + \frac{Y_s}{1 + Y_c}$$

Donde:

Y_s = Incremento de pérdidas generadas en las pantallas metálicas:

$$Y_s = Y_{sc} + Y_{se}$$

Y_{sc} = Incremento de pérdidas generadas en las pantallas metálicas debido al efecto de las corrientes circulantes, que son corrientes inducidas debido a la corriente principal en el conductor

Y_{se} = Incremento de pérdidas generadas en las pantallas metálicas debido al efecto de las corrientes de Eddy, por tensiones inducidas. También llamadas corrientes de Foucault o de remolino

¿Dónde entran las pérdidas?

$$W_c = I^2 \cdot R_{ac}$$
$$R_{ac} = R_{dc} \cdot (1 + Y_c)$$

Lectura de ingeniería

Las pérdidas eléctricas son la carga térmica del sistema. Si el conductor se calienta, también cambia la resistencia, y el cálculo debe precisarse de forma consistente.

Conductor

Efecto Joule

Aislamiento

Dieléctricas

Pantalla / armadura

Circulantes + Eddy

Tubo / ducto metálico

Pérdidas adicionales

.Yc reúne efecto piel y efecto proximidad a la frecuencia fundamental.

- Los términos q_s y q_e incorporan pérdidas en elementos metálicos externos cuando aplican.
- La extensión armónica mantiene el mismo concepto: sumar pérdidas y convertirlas en incremento de temperatura.

¿Por qué hoy importan los armónicos?

Fuentes típicas

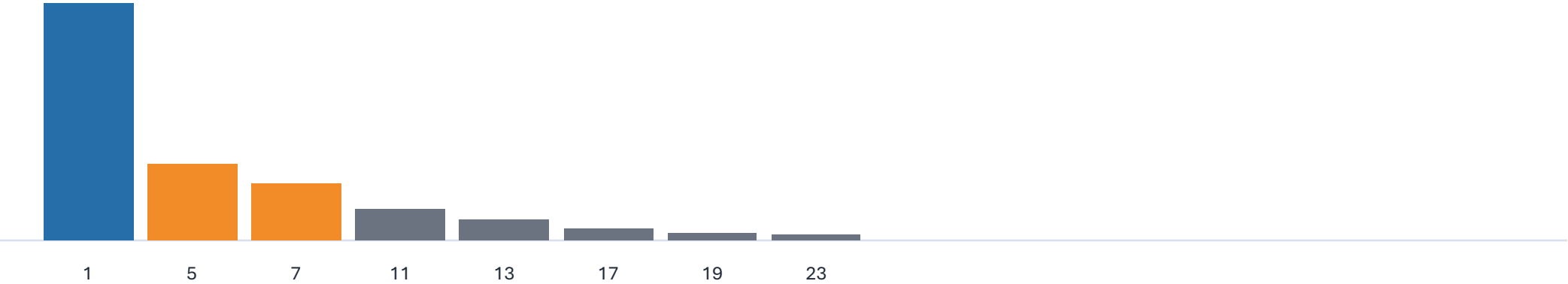
Variadores de frecuencia, fuentes conmutadas, rectificadores, inversores y otras cargas no lineales.

Efecto eléctrico

La corriente deja de ser puramente sinusoidal: aparecen componentes a múltiplos de la frecuencia fundamental.

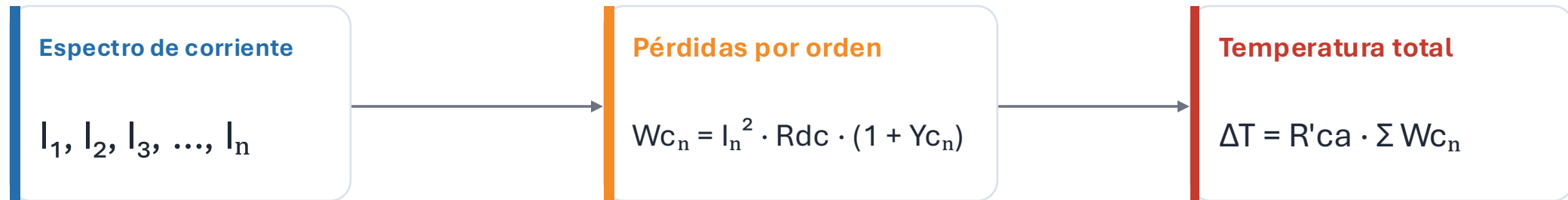
Efecto térmico

Cada componente armónica aporta pérdidas adicionales. Además, la alta frecuencia modifica la resistencia efectiva a la corriente alterna por efecto piel y efecto proximidad.



Órdenes armónicos: no basta un total, importa el detalle por frecuencia

Extensión a corrientes armónicas



Cambio conceptual

Ya no existe una sola resistencia AC: cada frecuencia tiene su propio incremento por efecto piel y proximidad.

$$IHD_n = I_n / I_1 \quad \text{con} \quad IHD_1 = 1$$

Fórmula canónica con contenido armónico

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc} \bar{R}'_{ca} \left[\sum_{i=1}^n (IHD_n)^2 (1 + Y_{cn}) \right]}}$$

 Σ

La suma acumula pérdidas por cada orden armónico

El peso principal es IHD_n^2

 Y_{cn}

El incremento AC cambia con la frecuencia

Incluye efecto piel y proximidad

 I_1

La corriente calculada sigue siendo fundamental

Se compara contra carga a 60 Hz

Implicación práctica

El modelo conserva la estructura térmica de Neher-McGrath y sustituye el término de pérdidas del conductor por una suma ponderada por el espectro armónico.

THDI vs IHD_n

THDI

Un porcentaje total de distorsión de corriente.
Excelente para diagnóstico y comparación rápida.

IHD_n

La fracción individual de cada orden armónico respecto a la fundamental. **Es el insumo requerido por el cálculo.**

Dato	Uso principal	¿Sirve para pérdidas por orden?
THDI = 39%	Resumen del espectro	No por sí solo
IHD ₅ , IHD ₇ , IHD ₁₁ ...	Cálculo por frecuencia	Sí

Para mayor precisión, considerar hasta la armónica de orden más alto registrada, incluyendo supra-armónicas.

Cálculo de Y_{c_n} : Efectos piel y proximidad

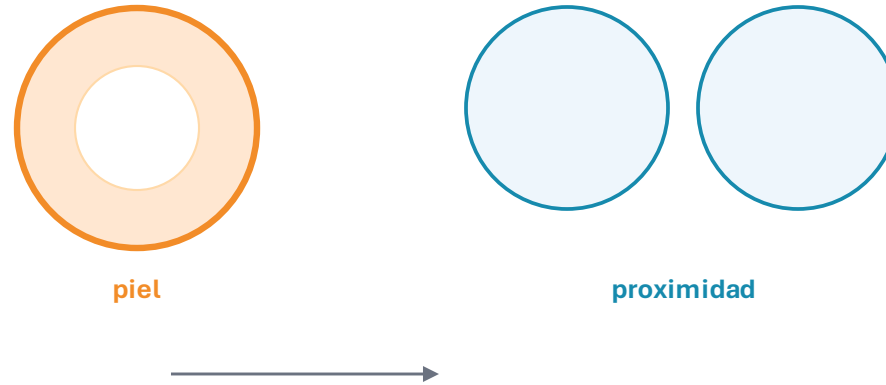
$$Y_{c_n} = Y_{s_n} + Y_{p_n}$$

Y_{s_n} : efecto piel

A mayor frecuencia, la corriente tiende a concentrarse hacia la periferia del conductor.

Y_{p_n} : efecto proximidad

El campo de conductores cercanos redistribuye la corriente y aumenta pérdidas.



Variables del estándar IEC 60287

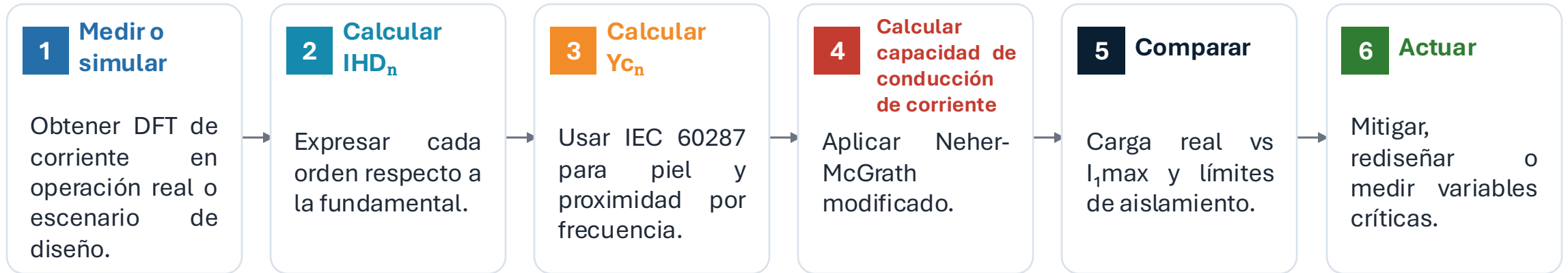
f_n , R_{dc} , d_c , S , k_s y k_p . El resultado depende de construcción del conductor, arreglo físico, frecuencia y temperatura.

Conclusión: no se puede cuantificar el impacto de armónicos con una regla genérica.

POR LO TANTO, CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN DE CORRIENTE TOTALMENTE DEPENDIENTE DE:

- **Espectro armónico real específico**, hasta la armónica de más alto orden posible
- **Temperatura de operación del conductor**, limitada por la temperatura máxima de operación del aislamiento en estado estable; y la temperatura máxima de operación del aislamiento en condiciones temporales de sobrecarga
- **Temperatura ambiente**
- **Resistencias térmicas involucradas**; en el caso de cables subterráneos, la resistividad térmica del terreno tiene un alto impacto
- **Material, sección y tipo de puesta a tierra** de las pantallas/cubiertas metálicas o ductos metálicos (cuando aplique)
- **Material/sección del conductor principal**
- **Número de conductores principales del circuito**

Flujo de trabajo recomendado



Validación

El artículo recomienda reproducir primero las condiciones originales de diseño para validar la hoja de cálculo; después se calculan las condiciones reales.

Caso de estudio: VFD industrial

650 HP

Motor trifásico accionado por VFD

460 V, 60 Hz

708 A

Corriente nominal total

a frecuencia fundamental

236 A
(fundamental)

Corriente por cable/fase

3 cables/fase

250 kcmil

Cable Cu RHH/RHW,
XLPE 600 V

conductor redondo
comprimido

Datos de cable
dc = 13.3 mm | Dext = S = 18.90 mm | ks = kp = 1 | Tc = 90 °C normal | Ts = 130 °C sobrecarga transitoria



Banco de ductos subterráneos

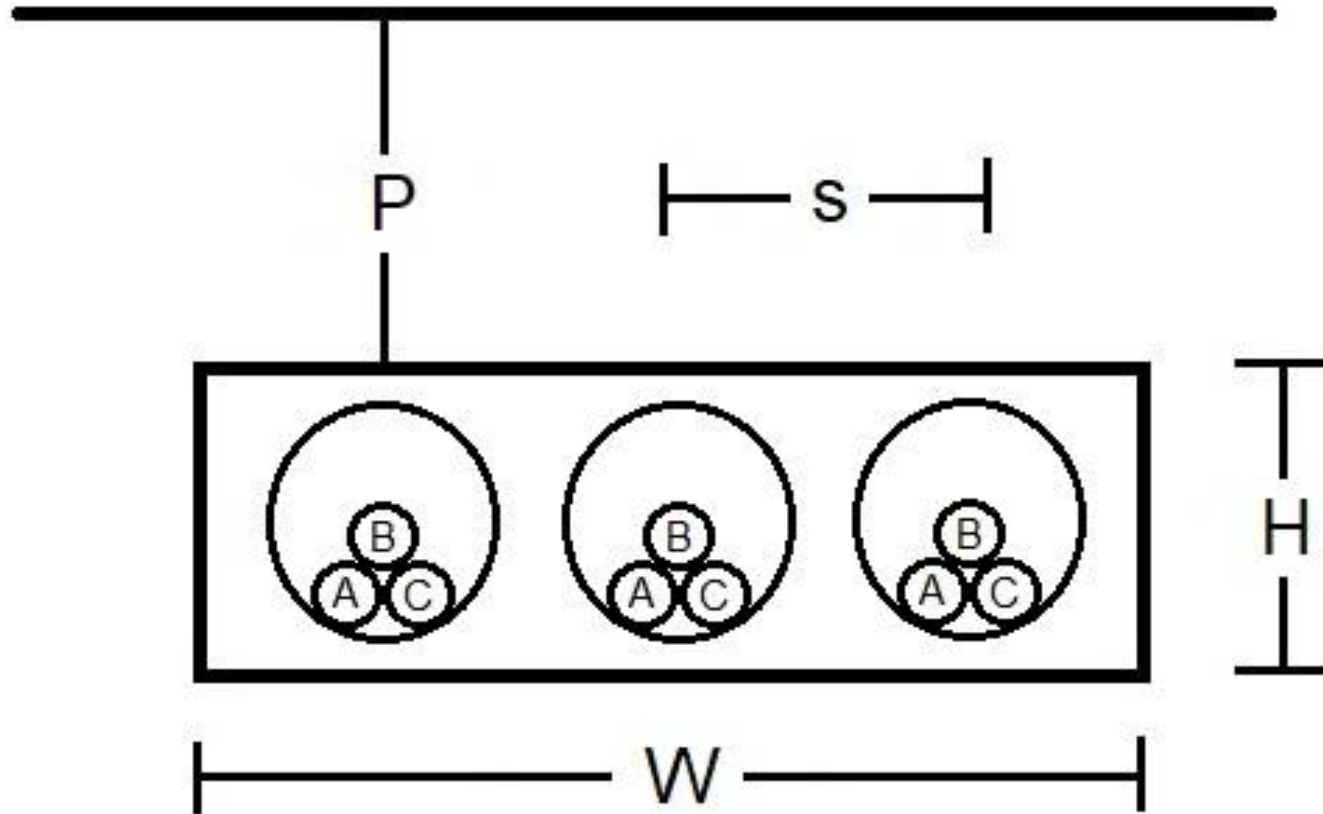


Figura 1 del artículo

Geometría de instalación

$P = 1 \text{ m}$
 $S = 19 \text{ cm}$
 $H = 0.29 \text{ m}$
 $W = 0.7 \text{ m}$

Ductos PVC cédula 40

Dext = 114.5 mm
Dint = 102.3 mm
Longitud total = 105 m

Punto crítico

En instalaciones subterráneas, la resistividad térmica del terreno puede dominar la disipación hacia el ambiente.

Diseño original: “cumple” en papel

Supuestos originales

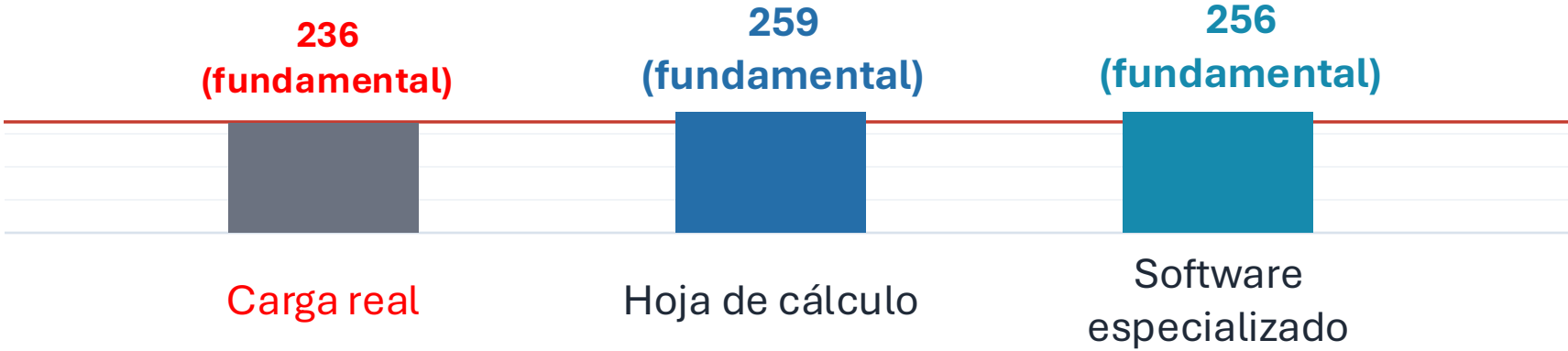
LF = 100%
Ta = 20 °C
RHO = 90 °C·cm/W
THDI = 0

Capacidad calculada

Hoja de cálculo: 259 A (fundamental)
Software especializado: 256 A (fundamental)
Carga real: 236 A/cable (fundamental)

Lectura inicial

259 A > 236 A (fundamental)
El arreglo parecía cumplir por capacidad de conducción de corriente, caída de tensión y cortocircuito.



Validación inicial: el modelo reproduce el resultado del software con una diferencia mínima

Lo que ocurrió en campo

>90 °C

Temperatura por encima de
operación normal del aislamiento
durante ciertos períodos del proceso

>130 °C

Incluso por encima de la condición
de sobrecarga transitoria
límite para períodos cortos de sobrecarga

↑ pérdidas

Pérdidas reales mayores que
las de diseño
impacto económico y térmico

Evidencia operacional

Pruebas comparativas de resistencia de aislamiento indicaron degradación acelerada del aislamiento de los cables.

Recomendación inmediata

Revisar la ingeniería original, comenzando por la capacidad de conducción de corriente bajo condiciones reales.

El síntoma térmico obliga a volver al modelo, no solamente a revisar protecciones.

Revisión de condiciones reales



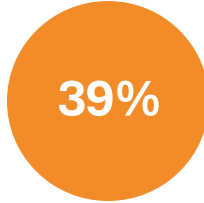
26°C

Ta real



140

RHO °C·cm/W



39%

THDI



DFT

IHD_n hasta 50^a

Qué cambió

La temperatura ambiente real era mayor que la supuesta, el terreno era arenoso y muy seco, y existía alto contenido de corrientes armónicas.

Por qué importa RHO

La resistividad térmica del terreno es crítica en cables subterráneos: si el suelo no evacúa calor, la misma corriente produce mayor temperatura.

La revisión se centra en máxima carga, aunque el artículo aclara que idealmente debe evaluarse todo el perfil de carga.

Medición DFT: el contenido armónico real

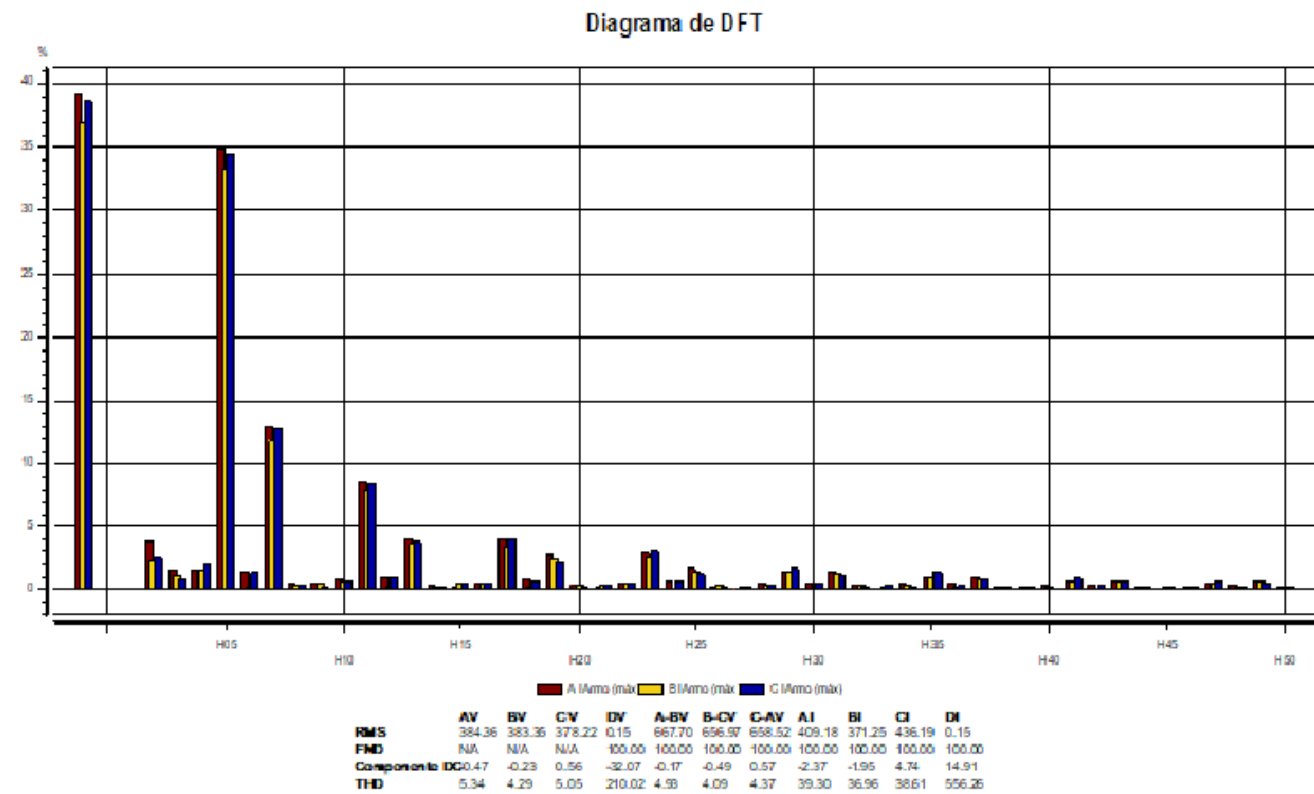


Figura 2 del artículo

Medición

Analizador de calidad de energía en la entrada del VFD, condición de máxima carga.

Dato informativo

THDI = 39%

Insumo de cálculo

Valores individuales de IHD_n exportados a hoja de cálculo.

Validación del modelo en hoja de cálculo

Primero se reproduce el cálculo original; luego se cambian las condiciones.

Paso 1: caso base

LF = 100% | THDI = 0

Ta = 20 °C | RHO = 90 °C·cm/W

Paso 2: comparación

Hoja electrónica: I = 259 A (fundamental)

Software: I = 256 A (fundamental)

≈ 1.2%

Diferencia relativa aproximada

permite validar el modelo

259 A (fundamental)

Capacidad calculada con
supuestos originales

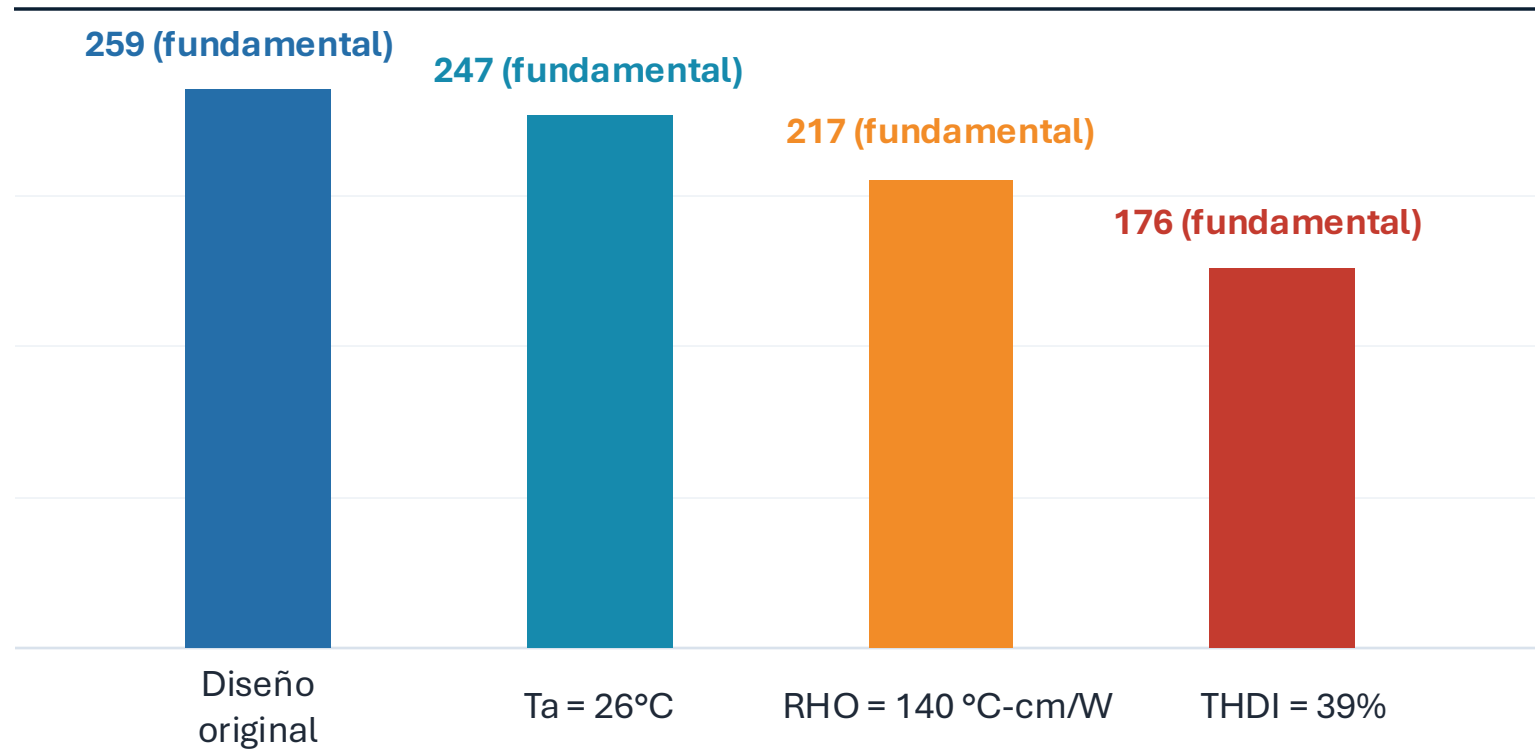
mayor que 236 A (fundamental)

Punto de partida

A partir de aquí se
incorporan condiciones
reales

a) Ta b) RHO y c) DFT

Resultado: reducción considerable de la capacidad admisible



-32%

Reducción de capacidad
respecto al diseño original

259 A → 176 A (a la fundamental)

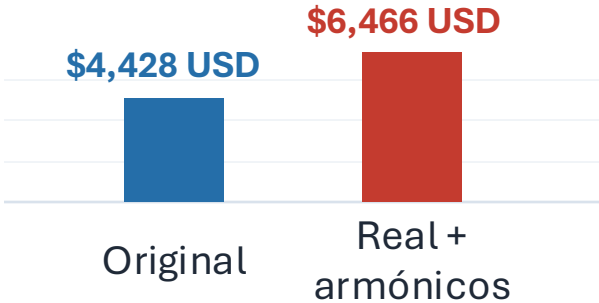
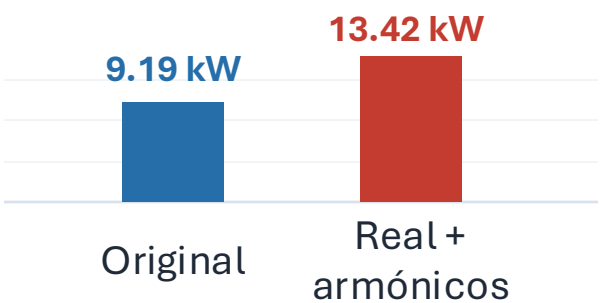
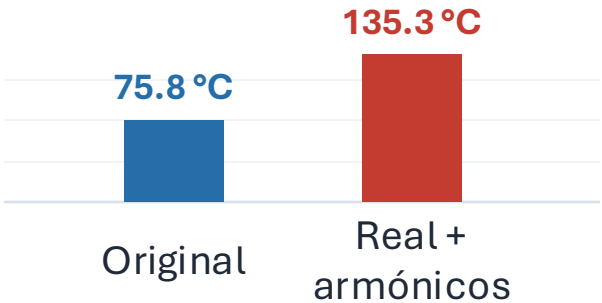
176 A

Capacidad real calculada a
la fundamental

menor que 236 A

Conclusión: con condiciones reales, el cable queda por debajo de la corriente nominal por cable/fase.

Resultado: mayor incremento de temperatura, mayores pérdidas y mayores costos adicionales



El efecto combinado de temperatura y altas frecuencias acelera la degradación del aislamiento

Tabla resumen ejecutiva

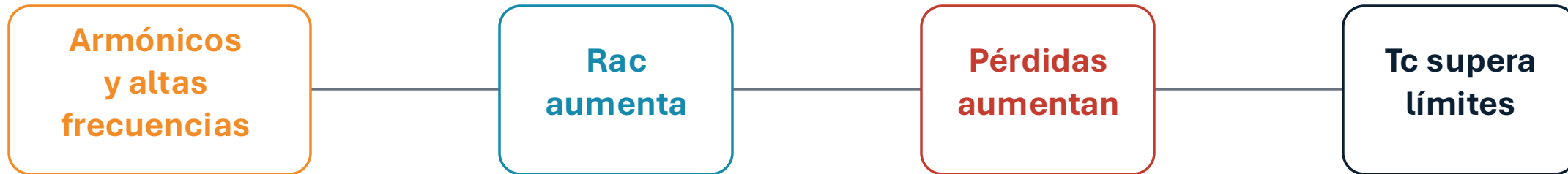
Condición	I hoja (A)	Software (A)	FC	Tc (°C)	Rac (Ω/km)	Pérdidas (kW)	Costo/año
Diseño original	259	256	1.000	75.8	0.1746	9.19	\$4,428 USD
Ta = 26 °C	247	245	0.954	83.1	0.1748	9.20	\$4,433 USD
RHO = 140 °C·cm/W	217	214	0.838	105.7	0.1873	9.86	\$4,751 USD
THDI = 39% + DFT	176	?	0.680	135.3	0.2549	13.42	\$6,466 USD

Lectura rápida

La variable que más desplaza el resultado después de ajustar el terreno es el contenido armónico. Respecto a las condiciones originales de diseño:

- La capacidad de conducción de corriente se reduce en un 32%: de 259 A a 176 A (a la fundamental)
- La temperatura de operación en estado estable aumenta en un 178.5%: de 75.8 °C a 135.3 °C
- La Resistencia efectiva a la C.A. se incrementa en un 46%: de 0.1746 Ω/km a 0.2549 Ω/km
- Las pérdidas se incrementan también en un 46%: de 9.19 kW a 13.42 kW
- **Y POR LO TANTO, EL COSTO DE LAS PÉRDIDAS SE INCREMENTA ASIMISMO EN UN 46%: de \$4,428 USD a \$6,466 USD, \$2,038 USD costo real anual adicional a lo estimado**

Interpretación técnica de la degradación



- El espectro armónico afecta tanto el efecto piel como el efecto proximidad.
- Temperatura ambiente y resistividad térmica del terreno tienen impacto significativo en cables subterráneos.
- La degradación del aislamiento se acelera con temperatura, humedad, contaminación y armónicos de mayor magnitud u orden.
- Para media y alta tensión conviene evaluar también pérdidas dieléctricas con DFT de voltaje.

Rediseño recomendado y mitigación

500 kcmil

Sección mínima recomendada
por proceso iterativo

bajo condiciones reales

257 A

Capacidad máxima admisible a
la fundamental

Mayor a 236 A/cable por fase

78.1 °C

Temperatura de operación en
estado estable

por debajo de 90 °C

Impacto económico

Pérdidas = 6.0 kW

Costo anual = \$2,891 USD

Mitigación complementaria

a) Compensación de potencia reactiva y b) mitigación armónica pueden reducir más pérdidas y mejorar aún más la eficiencia del sistema.

- 55% de reducción de pérdidas vs pérdidas en condiciones reales: de 13.4 kW a 6.0 kW
- **55% DE REDUCCIÓN EN EL COSTO DE LAS PÉRDIDAS: de \$6,466 USD a \$2,891 USD**
- **UN AHORRO TOTAL ANUAL DE \$3,575 USD POR MENORES PÉRDIDAS**

Cierre: mensajes clave

- El modelo propuesto modificado conserva la base térmica de Neher-McGrath e incorpora el espectro armónico de corriente.
- El THDI ayuda a diagnosticar, pero el cálculo requiere IHD_n por orden armónico.
- RHO del terreno, temperatura ambiente y arreglo físico pueden cambiar la capacidad de conducción de corriente y por lo tanto, la sección mínima recomendada del conductor
- No es posible generalizar el incremento de Rac y pérdidas: cada instalación debe calcularse cuidadosamente.
- **La mitigación armónica y la calidad de la potencia son parte de la eficiencia energética.**

Preguntas y discusión

EFICIENCIA ENERGÉTICA = AHORRO DE ENERGÍA + CALIDAD DE LA POTENCIA

Autor del artículo

Ing. Leopoldo Martínez Basulto
GMC Instruments
Gerente de Ventas para Latinoamérica

¡Muchas gracias!