



Factores de corrección de los rangos eléctricos para tableros de media tensión aislados en aire por altitud de operación

- Dany Huamán, Ingeniero de Especificación para Perú

Programa Digital de Especificación
América Latina



Resumen

Este artículo muestra y compara los factores de corrección en los rangos eléctricos por efectos de altitud de operación en los tableros de media tensión aislados en aire que son fabricados considerando en su mayoría dos de las normas más importantes a nivel mundial: IEC y ANSI.

De los casos aplicativos que se plantean en el presente documento se muestra que el factor de corrección por efecto de altitud de operación más relevante es el voltaje de descarga atmosférica (kBIL).

Así mismo, este artículo técnico pretende ser una referencia para la adecuada selección en el tipo de tableros de media tensión a utilizar de acuerdo a su altitud de servicio; una selección incorrecta puede originar problemas como: fallas por pérdida de rigidez dieléctrica, sobredimensionamiento del equipamiento eléctrico que se traduce en sobre costos, o la aplicación de otras soluciones como tableros aislados en gas (de mayor precio).

1. Introducción

América Latina se caracteriza por condiciones geográficas de gran altitud. La Cordillera de los Andes comprendida entre Argentina, Chile, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia y parte de Venezuela, es una cadena de montañas en las que se encuentran ciudades, industrias y unidades de explotación minera a alturas superiores a los 1,000 metros sobre el nivel del mar; a dichas alturas los rangos eléctricos de funcionamiento del equipamiento de los tableros, se ven afectadas en sus propiedades dieléctricas debido a la reducción de la densidad del aire.

En este documento se presentan dos ejemplos aplicativos, en los cuales se muestran que el principal factor eléctrico afectado por la altitud de operación del tablero son: el voltaje y los rangos de aislamiento (tensión de frecuencia industrial y tensión atmosférica por rayo), siendo este último el de mayor relevancia cuando la altura es superior a los 1,000 m.s.n.m. ya que el factor de corrección se encuentra directamente relacionado al valor de una función exponencial.

2. Estandarización de los rangos eléctricos de los tableros

2.1 Condiciones normales de operación

Las condiciones normales de operación han sido definidas por los estándares de construcción IEC y ANSI para funcionar normalmente considerando las siguientes variables y rangos: la temperatura de medio ambiente, altitud de operación, humedad y radiación solar. Para condiciones inusuales de funcionamiento los estándares recomiendan el uso de factores de corrección.

Tabla N° 1: Condiciones normales de operación

Estándar	IEC IEC 62271-200	ANSI IEEE C37.20.2
Temperatura		
Ambiente instantáneo 0°C		
Mínimo	-5 °C	-30 °C
Máximo	-40 °C	+40 °C
Valor máximo promedio diario	35 °C	No especifica
Altitud		
Altitud máxima (metros)	≤ 1000	≤ 1000
Radiación Solar		
Radiación Solar	No específica	No significativa ANSI Std C37.24-1986
Humedad		
Promedio relativo de humedad respecto a un periodo		(*)
24 horas	95%	No específica
01 mes	90%	No específica

Tabla referida de los estándares IEC 62271-200 y ANSI C37.20.2

Nota: (*) El estándar ANSI C37 1999-2000 recomienda en la cláusula 8.1.4.3 el uso de resistencias en adecuadas cantidades y de suficiente potencia para minimizar la condensación en todos los compartimientos - General Electric toma como referencia una humedad máxima sin condensación del 90% para sus equipos en media tensión (CCM). Manual de aplicación GET-6840C

2.2 Rangos eléctricos

Los rangos eléctricos son definidos por los estándares IEC y ANSI como rangos de voltaje, corriente y niveles de aislación.

2.2.1 Rango de voltaje

Para los tableros, el estándar IEC define al voltaje nominal: U_n (kV) como rango de voltaje; mientras que el estándar ANSI define al voltaje máximo como: U_{max} (kV).

Tabla N° 2: Rangos de Voltaje

IEC Serie I U_n (kV)	3.6		7.2		12		17.5	24		36	40.5
IEEE U_{max} (kV)		4.76		8.25		15		27		38	

Tabla referida de los estándares IEC 62271-100: 2006 y ANSI C37.06.1-2000 IEC Serie I referido a equipos de uso interior

2.2.2 Rango de corriente

Se define valores de corriente (I_r) de acuerdo a cada estándar.

Tabla N°3: Rango de Corrientes

IEC (A)	630		1250	1600		2500		3150
ANSI (A)		1200			2000		3000	

Tabla referida de los estándares IEC 62271-100: 2006 y ANSI C37.06.1-2000

(*) No se considera ventilación forzada

2.2.3 Niveles de aislación

Los estándares clasifican los niveles de aislación para tableros como:

- Voltaje de resistencia a la frecuencia industrial
- Voltaje de resistencia a las descargas atmosféricas

Tabla N° 4: Niveles de aislación

Voltaje (kV)		Voltaje Frecuencia Industrial (kV rms)		Voltaje descarga Atmosférica BIL (kVp)	
Grado Umax	Rango Un	ANSI	IEC	ANSI	IEC
ANSI	IEC	ANSI	IEC	ANSI	IEC
4.16		19		60	
7.2	7.2	36	20	95	60
	12		28		75
13.8		36		95	
	17.5		38		95
	24		50		125
27		60		125	
	36		80		170
38		80		150	
	40.5		95		185

Tabla referida de los estándares IEC 62271-100: 2006 y ANSI C37.06.1-2000

3. Factor de corrección por altitud

3.1 Según estándar IEC

El estándar IEC 62271-200 dentro de sus cláusulas para condiciones inusuales como la altitud, recomienda el uso de factores de corrección.

Variables críticas afectadas:

3.1.1 Factor de corrección por voltaje

Está relacionada con la dependencia de la presión atmosférica de la altitud, la cual esta referenciada en el estándar IEC 721-2-3. Para el cálculo del factor de corrección se utiliza la fórmula siguiente:

Tabla N° 5: Factores de corrección voltaje por altitud

Item	Factor	ACF
Voltaje	$m = 1$	$Ka = e^{m(H-1000)/8150}$

Tabla referida de los estándares IEC 60071-2: 1996

Nota: El exponente m depende de varios parámetros, incluyendo la ruta de descarga mínima que es generalmente desconocido en la etapa de diseño. La determinación del exponente m se basa en el estándar IEC 60-1.

- H = Altitud por encima del nivel del mar dado en metros
- m = 1,0 para coordinación por tensión atmosférica de impulso que puede soportar.
- m = 1,0 para tensiones de frecuencia industrial que se puede soportar en espacios de aire y aisladores limpios.

3.1.2 Factor de corrección por corriente

La corrección por corriente está relacionada con la dependencia de la presión atmosférica con la altitud y se encuentra referenciado a la norma IEC 721-2-3. El factor de corrección puede ser calculado de la siguiente formula.

Tabla N° 6: Factores de corrección corriente

Nota: H = Altitud por encima del nivel del mar dado en metros

Item	ACF
Corrientes	$ACF = 1 - 0.02 * (H-1000)/1000$

Tabla referida al estándar IEC 60071-2

3.2 Según estándar ANSI

El estándar ANSI C37.20.2-1986 dentro de su cláusula 8.1.3; para condiciones inusuales como la altitud, recomienda el uso de factores de corrección para el voltaje y corriente, dados en la siguiente tabla:

Tabla N° 7: Factores de corrección por altitud

Altitud (m)	Altitud (ft)	ACF for dielectric withstand voltage	ACF for continuous current
1000	3300	1.00	1.00
1200	4000	0.98	1.00
1500	5000	0.95	0.99
1800	6000	0.92	0.99
2000	6600	0.91	0.99
2100	7000	0.89	0.98
2400	8000	0.86	0.97
2700	9000	0.83	0.97
3000	10000	0.80	0.96
3600	12000	0.75	0.95
4000	13000	0.72	0.94
4300	14000	0.70	0.94
4900	16000	0.65	0.925
5500	18000	0.61	0.91
6000	20000	0.56	0.9

Del estándar ANSI C37.20-1999

Para los cálculos de los factores de corrección por voltaje y corriente para alturas superiores a los 1,000 m.s.n.m. General Electric utiliza las siguientes ecuaciones:

3.2.1 Factor de corrección por voltaje

El factor de corrección puede ser calculado con las siguientes fórmulas:

Tabla N° 8: Factores de corrección por altitud

Ítem	Altura (feet)	ACF
Voltaje	$A < 3300$	$ACF = 1.0$
	$3300 \leq A < 5000$	$ACF = 1.0 - [0.0294 \times (A - 3.3 \text{ Mft})]$
	$5000 \leq A < 10000$	$ACF = 0.95 - [0.03 \times (A - 5.0 \text{ Mft})]$
	$A \geq 10000$	$ACF = 1.0 - [0.02 \times A]$

La tabla hace referencia al catálogo GET-6840C, General Electric que refleja la adopción del estándar ANSI C37.14

3.2.2 Factor de corrección por corriente

El factor de corrección puede ser calculado con las siguientes fórmulas:

Tabla N° 9: Factores de corrección por altitud

Ítem	Altura (feet)	ACF
Corriente	$A < 3300$	$ACF = 1.0$
	$3300 \leq A < 5000$	$ACF = 1.0 - 0.00588 \times (A - 3.3 \text{ Mft})$
	$5000 \leq A < 10000$	$ACF = 0.99 - 0.006 \times (A - 5.0 \text{ Mft})$
	$A \geq 10000$	$ACF = 1.0 - 0.004 \times A$

La tabla hace referencia al catálogo GET-6840C, General Electric que refleja la adopción del estándar ANSI C37.14

4. Casos de aplicación

4.1 Caso 1:

La Compañía Minera ABC situada a una altura de 3,000 m.s.n.m. desea seleccionar los tableros de media tensión para una subestación principal. El voltaje de operación es de 13.8kV y la corriente en barras principales de 1,500A y una corriente de cortocircuito de 23kA.

Según estándar IEC:

Los tableros requeridos por encontrarse a una altura de 3,000 m.s.n.m. deberán ser desclasificados en sus rangos eléctricos.

1. Cálculo del factor de corrección por voltaje:

$$K_a = e^{(3,000-1,000)/8,150} = 1,278$$

2. Cálculo del factor de corrección por corriente:

$$ACF = 1 - (3,000-1,000)/1,000 * 0.02 = 0.96$$

3. Selección de tableros:

De acuerdo a la tabla adjunta, el equipo a utilizar será un tablero modelo SecoGear GE de 24kV, 1600A de corriente y con tensión de impulso de 125kV, 25kA.

Tabla N° 10: Factores de corrección por altitud IEC

Rango	Voltaje de operación a 3,000 m.s.n.m	Factor Ka	Nuevo rango a 3,000 m.s.n.m	Rango Switchgear (ver Tabla 2,3,4)
Voltaje Operación	13,8 kV	1.278	17.63 kV	24 kV
Voltaje de descarga atmosférica	95 kV	1.278	121.41 kV	125 kV
Corriente Continua	1,500 A	0.96	1440 A	1600 A

Elaboración propia

Según estándar ANSI:

Los tableros requeridos por encontrarse a una altura de 3,000 m.s.n.m. deberán ser desclasificados en sus rangos eléctricos.

1. Cálculo del factor de corrección por voltaje:

$$\text{Si } A \geq 10 \text{ Mft; USAR: } ACF = 1.0 - [0.02 \times A]$$

$$ACF = 1.0 - [0.02 \times (10)] = 0.8$$

2. Cálculo del factor de corrección por corriente:

$$\text{Si } A \geq 10 \text{ Mft; USAR: } ACF = 1.0 - 0.004 \times A$$

$$ACF = 1.0 - 0.004 \times (10) = 0.96$$

3. Selección de tableros:

De acuerdo a la tabla adjunta, el equipo a utilizar será un tablero modelo Powervac GE de 27kV, 2000 A de corriente y con tensión de impulso de 125kV, 25kA.

Tabla N° 11: Factores de corrección por altitud ANSI/NEMA

Rango	Voltaje de operación a 3,000 m.s.n.m	Factor	Nuevo rango a 3,000 m.s.n.m	Rango Switchgear (ver Tabla 2,3,4)
Voltaje Operación	13,8 kV	0.8	17.25 kV	27 kV
Voltaje de descarga atmosférica	95 kV	0.8	118.75 kV	125 kV
Corriente Continua	1,500 A	0.96	1440 A	2000 A

Elaboración propia

4.2 Caso 2:

La Compañía Minera DEF situada a una altura de 4,500 m.s.n.m. desea seleccionar los tableros de media tensión para una subestación principal. El voltaje de operación es de 22.9kV y la corriente en barras principales es de 1,500A y una corriente de cortocircuito de 25kA.

Según estándar IEC:

1. Cálculo de factor de corrección por voltaje:

$$K_a = e^{(4,800-1,000)/8,150} = 1.594$$

2. Cálculo de factor de corrección por corriente:

$$ACF = 1 - (4500-1000)/1000 * 0.02 = 0.93$$

3. Selección de tableros:

De acuerdo a la tabla adjunta, el equipo a utilizar será un tablero modelo SecoGear GE de 40.5kV, 2,500A de corriente y con tensión de impulso de 185kV, 25kA.

Tabla N° 12: Factores de corrección por altitud IEC

Rango	Voltaje de operación a 4,500 m.s.n.m	Factor Ka	Nuevo rango a 4,800 m.s.n.m	Rango Switchgear (ver Tabla 2,3,4)
Voltaje Operación	22,9 kV	1.56	35.724 kV	40.5 kV
Voltaje de frecuencia industrial	50 kV	1.56	78kV	95 Kv
Voltaje de descarga atmosférica	125 kV	1.56	195 kV	185 kV
Corriente Continua	2,500 A	0.93	2,325 A	2,500 A

Elaboración propia

Según estándar ANSI:

1. Cálculo de factor de corrección por voltaje:

$$\text{Si } A \geq 10 \text{ Mft; USAR: } ACF = 1.0 - [0.02 \times A]$$
$$ACF = 1.0 - [0.02 \times (14,753/1,000)] = 0.70$$

2. Cálculo de factor de corrección por corriente:

$$\text{Si } A \geq 10 \text{ Mft; USAR: } ACF = 1.0 - 0.004 \times A$$
$$ACF = 1.0 - 0.004 \times (14,753/1,000) = 0.94$$

3. Selección de tableros:

De acuerdo a la tabla adjunta, el equipo a utilizar será un tablero modelo PowerVac GE de 38kV, 2000A de corriente y con tensión de impulso de 150kV, 25kA.

Tabla N° 13: Factores de corrección por altitud ANSI/NEMA

Rango	Voltaje de operación a 4,500 m.s.n.m	Factor	Nuevo rango a 4,500 m.s.n.m	Rango Switchgear (ver Tabla 2,3,4)
Voltaje Operación	22,9 kV	0.7	31,42 kV	38 kV
Voltaje de frecuencia industrial	50 kV	0.7	71.42 kV	80 Kv
Voltaje de descarga atmosférica	125 kV	0.7	178.6 kV	150 kV
Corriente Continua	1,500 A	0.94	1410 A	2000 A

Elaboración propia

5. Conclusión

De los casos aplicativos podemos concluir que la altura es un factor importante en la desclasificación de las características eléctricas del voltaje y corriente para tableros (tabla N° 2, 3 y 4). Siendo los voltajes nominal, voltaje de frecuencia industrial y voltaje de descarga atmosférica más afectadas por encontrarse relacionada su factor de desclasificación exponencialmente con la altura (tabla N° 6). Para el caso aplicativo N° 2, se puede observar para una altura de instalación a 4,500 msnm y un voltaje de servicio 22.9kV, la desclasificación de los rangos eléctricos obliga a considerar un tableros de clase 38kV NEMA ó 40.5kV IEC. En ambos casos no se llegó a cumplir con voltaje de descarga atmosférica estandarizada necesaria para cumplir con lo requerido.

De lo mostrado, los efectos de la altura son más evidentes en el voltaje de descarga atmosférica por considerar valores altos estandarizados, que al verse afectos al factor de desclasificación, alcanzan valores que no se encuentran contemplados entre los rangos kBIL estandarizados por NEMA e IEC. Una alternativa de solución es seguir las recomendaciones del estándar IEEE C37.20.2 donde en su cláusula 8.1.3 recomienda el uso de pararrayos para alturas superiores de 1,000 msnm para mantener los voltajes transitorios por debajo del límite permitido del equipo o analizar la posibilidad de usar tableros aisladas en gas SF6. Este tipo de equipos no se ven afectados por la altura ya que toda su parte activa se encuentra encerrada en SF6. La mejor selección del tipo de equipamiento a utilizar debe de obedecer a un análisis técnico y económico.

6. Bibliografía:

- PCIC Paper No. 2012- 015, "IEC & ANSI Medium Voltage Distribution Equipment Standards, Review & Analysis". Marcelo Valdez, Xuhui Ren, Shridhaval Sapre, Marty Trivette, Steven Meiners
- IEC 62271-200 ed2.0 (2011-10) – High-voltage switchgear and control gear – part 200: AC metal-enclosed tableros and control gear for rated voltages above 1kV and up to 52kV. Geneva, Switzerland: IEC
- IEEE C37.20.2-1999 – ANSI Standard for Metal-Clad Switchgear, New York, NY: ANSI
- IEEE C37.04-1999 – IEEE Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breaker
- ANSI C37.06.1-2000– Guide for High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis Designated
- GET-6840C- Guía de selección Arrancador de Media Tensión NEMA, Limitamp General Electric.
- GET 6600F-Guia de aplicación Medium Voltage Tableros NEMA – Power/Vac
- Guía de selección Tableros Aislados en Aire en Media Tensión IEC – GE SecoGear
- Guía de selección Tableros Aislados en Gas en Media Tensión IEC - GE SecoCube