



## **DOCUMENTO TÉCNICO**

# **Guía para Desarrollo de Verificación Sísmica de Equipos en Colombia, aplicación de la norma IEEE-693**

**Diciembre de 2019**



Comité de estudios subestaciones e instalaciones eléctricas  
Grupo de trabajo Ingeniería Civil

Fecha: 19-12-2019

## **Guía para Desarrollo de Verificación Sísmica de Equipos en Colombia. Aplicación de la norma IEEE-693**

### **Resumen**

Recomendaciones para el diseño sísmico de equipos eléctricos y sus respectivas estructuras soporte según norma IEEE – 693 2018 aplicado a subestaciones eléctricas en Colombia. Las recomendaciones comprenden el criterio sísmico, métodos y niveles de calificación según el equipo y la amenaza sísmica de la zona de implantación, capacidades estructurales, requisitos de desempeño en la operación del equipo, métodos de instalación y presentación de la documentación del proceso.

### **Palabras clave**

Anclaje, conductor, equipo eléctrico, amortiguamiento, análisis dinámico, cargas, combinaciones de cargas, nivel de desempeño, espectro de respuesta requerido, dispositivos de protección sísmica, calificación sísmica, mesa vibratoria, análisis de coeficiente estático, estructura soporte, equipo suspendido y tiempo historia.



## 1 GENERALIDADES

En este documento se exponen las recomendaciones mínimas para el diseño y la calificación sísmica de equipos eléctricos, las estructuras soporte y los anclajes al cimiento; creado como consecuencia de la necesidad de tener una guía clara y concisa basada en los estándares internacionales aplicados a las subestaciones eléctricas en Colombia.

## 2 PARTICIPANTES

El grupo de trabajo estuvo conformado por las personas que se listan a continuación:

Lideres

Luis Horacio Muñoz Ortiz	Interconexión Eléctrica S.A.
Horacio Mantilla Jiménez	Interconexión Eléctrica S.A

Integrantes

Maria Carolina Turga Zambrano	GE Renewable Energy
Jairo Moreno Fernández	Grupo Energía Bogotá
Libardo Ruiz Piedrahita	HMV Ingenieros
Edison Agudelo	HMV Ingenieros
Giovanni Gelves Gelves	EDEMCO
Juan Carlos Orozco Fonnegra	EPM
Alejandro Cadena Isaza	EPM
Héctor Fabio Oviedo Rincón	IEB S.A
José Aldemar Del Rio Cobaleda	SIEMENS
Daniel Guevara Aristizábal	CELSIA

Un especial agradecimiento al Profesor Juan Diego Jaramillo, su generoso aporte y aclaraciones.

## 3 ALCANCE

La actual guía se enfoca en el diseño y calificación sísmica de los equipos, las estructuras soporte y los anclajes al cimiento de las nuevas subestaciones eléctricas en Colombia, las subestaciones futuras y las ampliaciones de las subestaciones existentes.

Es así como, basados en los estándares internacionales, se incluye en el desarrollo del documento el proceso y calificación del nivel sísmico exigido para el sitio del proyecto



considerando los mapas de amenaza sísmica de Colombia y los estudios geológicos y geotécnicos propios del proyecto; además se exponen los diferentes procesos analíticos que deben cumplir los equipos según su función y su nivel de tensión y los criterios de aceptación del comportamiento del conjunto equipo-estructura.

No hace parte del alcance del presente documento las edificaciones de las subestaciones eléctricas, las cuales serán diseñadas de acuerdo con el reglamento NSR en vigencia. Tampoco hace parte del alcance el diseño de las fundaciones de los equipos eléctricos, cuyo diseño está sujeto a las condiciones locales del sitio y bajo los criterios de aceptación del CONTRATANTE del proyecto.

Finalmente se aclara que, ante cualquier tipo de inquietud o interpretación, predomina los conceptos y requerimientos de la norma IEEE-693 (2018).

#### **4 OBJETIVOS**

Los principales objetivos de los estándares internacionales de subestaciones eléctricas son proporcionar recomendaciones de diseño básicas para mitigar daños significativos ante eventos sísmicos, y por medio de la estandarización de equipos eléctricos y sus estructuras soporte, hacer posible la disponibilidad de instalación inmediata en múltiples lugares que cuenten con la misma calificación sísmica.

Esta guía comparte esos objetivos y adicionalmente, pretende dar mayor claridad de los requerimientos sísmicos de las normas internacionales en la aplicación para el caso colombiano.

#### **5 DEFINICIONES, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS**

Aisladores compuestos: Aisladores con núcleo de fibra reforzada con terminaciones en metal y vaina y cobertizos elastómeros.

ASD: Allowable Stress Design / Diseño por esfuerzos admisibles.

Calificación sísmica: Nivel de demanda estandarizado que debe soportar el equipo de acuerdo de PGA del sitio donde será instalado.

CQC: Complete quadratic combination / Combinación cuadrática completa: Es un método de combinación modal para todo tipo de sistemas, en especial para los sistemas de frecuencias de espacio cerrado.

Equipo flexible: Equipos, estructuras y accesorios cuya primera frecuencia modal sea menor que 33 Hz.

Equipo rígido: Equipos, estructuras y accesorios cuya primera frecuencia modal sea mayor que 33 Hz.



Estructura soporte equivalente o mejor dinámicamente: Estructura soporte que transmita igual o menor demanda al equipo, que aquella estructura soporte en la cual el equipo fue sísmicamente calificado.

LRFD: Load Resistance Factor Design / Diseño por factores de Resistencia y carga

Material dúctil: Material que cuenta con deformación plástica considerable previo a la fractura total. Las deformaciones consideradas pueden tomarse como aquellas mayores que 10% en 5 cm en la falla en tensión.

Material frágil: Material que cuenta con poco o ninguna deformación plástica previo a la fractura total. Las deformaciones limitadas pueden tomarse como aquellas menores que 10% en 5 cm en la falla en tensión.

Nivel de diseño: Nivel de excitación o evento sísmico que es la mitad del nivel de desempeño. En este nivel, el equipo calificado debe cumplir con total funcionalidad y sin ningún tipo de daño.

PGA: Peak Ground Acceleration / Aceleración máxima en suelo.

PL: Performance Level / Nivel de desempeño: Nivel de excitación o evento sísmico donde el del equipo calificado tiene un desempeño aceptable con pocos o sin ningún daño estructural significativo.

RRS: Required Response Spectrum / Espectro de respuesta requerido: Espectro de respuesta que define el nivel requerido de la excitación para un nivel de calificación sísmica dado.

Response Spectrum / Espectro de respuesta: Curva de la máxima respuesta de un arreglo de un sistema de un grado de libertad o péndulo invertido.

S1: Earthquake corresponds in nuclear applications to the operating base earthquake (OBE) acorde con IEC 60068.

S2: Earthquake corresponds in nuclear applications to the safe shutdown earthquake (SSE), acorde con IEC 60068.

SRSS: Square root of the sum of the squares / Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados: Es un método de combinación modal, en especial para los sistemas de frecuencias de espacio abierto.

Ss : Valor máximo del espectro de aceleraciones para el Máximo Sismo Considerado (MCEr) ASCE 07-10

TRS: Test Response Spectrum (Entrada para las pruebas de mesa)

Variables críticas: Deformaciones, esfuerzos y deflexiones determinadas en puntos que indican la capacidad sísmica o estructural de un elemento.

Verificación sísmica: Garantía de cumplimiento del equipo ante el estándar internacional exigido por el CONTRATANTE o los pliegos del proyecto.

ZPA: Zero period acceleration / Aceleración pico efectiva, PGA en suelo según IEEE-693.

## 6 CONCEPTO BÁSICO DE IEEE-693

El estándar IEEE-693 fue desarrollado como una integración de requerimientos de calificación sísmica para los equipos y los elementos de subestaciones eléctricas más comunes. El estándar se compone de un cuerpo de documento donde se presentan conceptos y procedimientos comunes de calificación, resistencia y demanda de subestaciones ubicadas en zonas con amenaza sísmica; posteriormente, el estándar expone requisitos particulares para cada equipo en sus diferentes anexos.

### 6.1 Niveles de Calificación y Selección

El nivel de calificación sísmica se define como la magnitud de excitación para el cual el equipo debe mantener el objetivo de calificación sísmica. A continuación, se presentan los tres niveles de calificación de acuerdo con el estándar IEEE-693

**Tabla 1 Niveles de Calificación Sísmica según IEEE-693 2018**

PGA	Nivel de calificación
< 0,1g	Bajo
0,1 g < PGA < 0,5 g	Moderado
> 0,5 g	Alto

Donde la aceleración máxima en suelo (PGA: Peak Ground Acceleration) debe estar determinada para una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años o 2475 años de periodo de retorno, a partir de un estudio de respuesta local de sitio siguiendo procedimiento en donde se incluya el análisis de efectos locales de sitio, o en su defecto empleando el siguiente el procedimiento:

- Caracterizar el perfil del suelo según NSR-10 o versión vigente (A, B, C, D, E, F en Colombia).
- Determinar  $S_s$

La variable  $S_s$ , asociada al Máximo Sismo Considerado ( $MCE_R$ ) es la ordenada espectral para un período de 0.2 s, calculada para un espectro del 5% de amortiguamiento, en

roca y con una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años o 2475 años de periodo de retorno.

La publicación AIS 180-13 “Recomendaciones para requisitos sísmicos de estructuras diferentes de edificaciones” de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, realiza un análisis de equivalencia de las aceleraciones pico efectivas de la norma NSR-10 con el valor  $S_s$  del ASCE 7-10, con el fin de establecer movimientos sísmicos de diseño compatibles.

Como resultado de este análisis, el documento AIS-180-13 publica un mapa de zonificación del valor de  $S_s$  para Colombia, ver Figura 1

De este mapa y de acuerdo con la localización geográfica del sitio de instalación se selecciona el valor de  $S_s$ .

c) Determinar  $F_a$

Se establece la aceleración espectral para período cero (ZPA)

$$ZPA = S_s/2,5$$

A partir del ZPA, el perfil del suelo y usando la tabla A.2.4-3 de la NSR-10, se define el valor de  $F_a$

**Tabla 2 Valores de  $F_a$ .**  
(Tomado de Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10)

**Tabla A.2.4-3**  
Valores del coeficiente  $F_a$ , para la zona de periodos cortos del espectro

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
<b>A</b>	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
<b>B</b>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>C</b>	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
<b>D</b>	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
<b>E</b>	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
<b>F</b>	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

**Nota:** Para el perfil tipo **F** debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

d) Determinar PGA

$$PGA = F_a \cdot S_s/2,5$$

e) Seleccionar el nivel de calificación considerando los tres niveles de la Tabla 1.

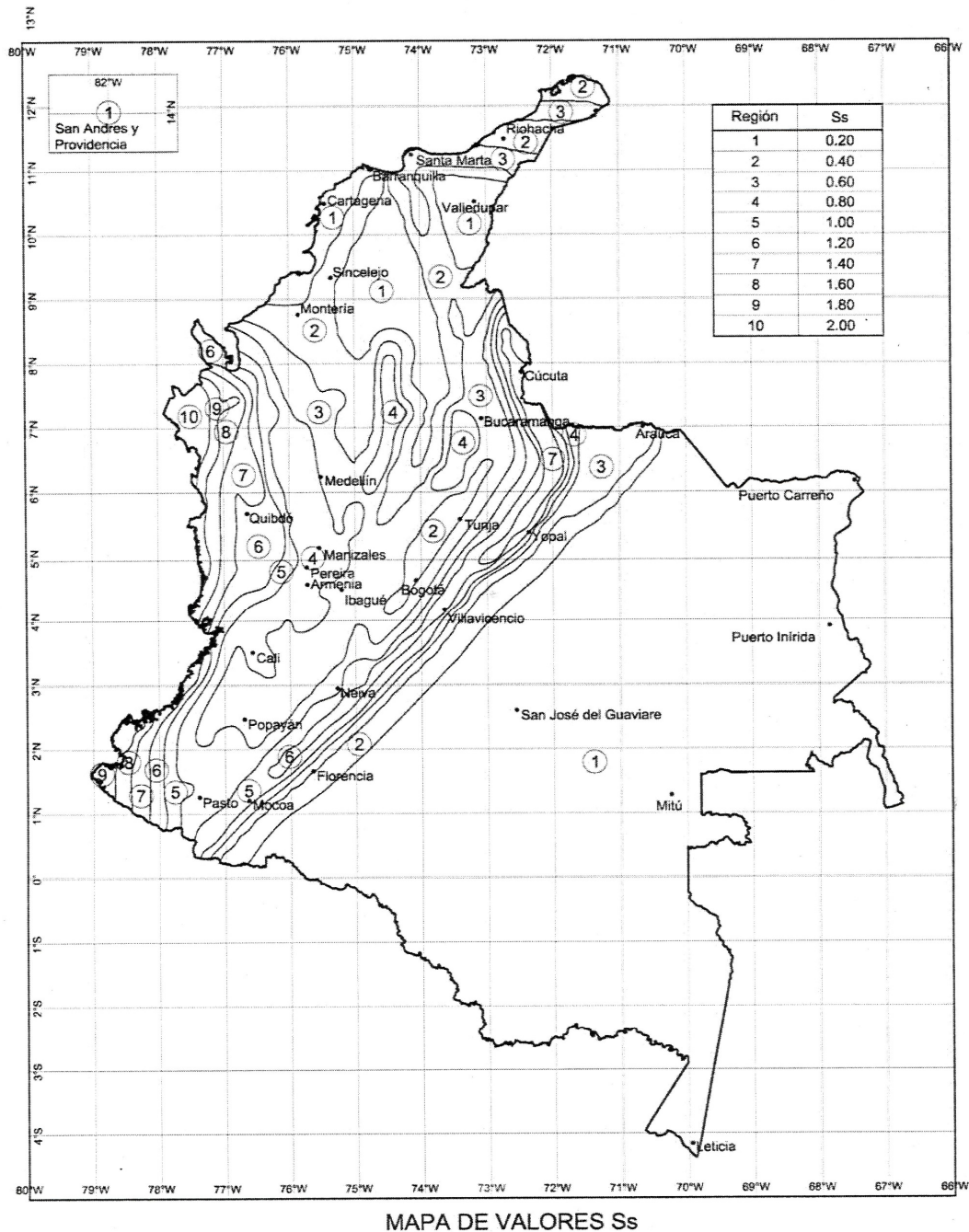


Figura 1 Mapa de valores de Ss tomado de AIS-180-13. Apéndice C



Teniendo en cuenta los diferentes perfiles de suelo considerados en la NSR-10, la zonificación de los niveles de desempeño sísmico IEEE-693 en Colombia serían los siguientes

**Tabla 3 Zonificación del nivel de calificación sísmica de acuerdo a IEEE-693**

ZONA	Ss	ZPA	Suelo A		Suelo B		Suelo C		Suelo D		Suelo E	
			Fa	PGA	Fa	PGA	Fa	PGA	Fa	PGA	Fa	PGA
1	0.20	0.08	0.80	0.06	1.00	0.08	1.20	0.10	1.60	0.13	2.50	0.20
2	0.40	0.16	0.80	0.13	1.00	0.16	1.20	0.19	1.48	0.24	2.02	0.32
3	0.60	0.24	0.80	0.19	1.00	0.24	1.16	0.28	1.32	0.32	1.50	0.36
4	0.80	0.32	0.80	0.26	1.00	0.32	1.08	0.35	1.18	0.38	1.14	0.36
5	1.00	0.40	0.80	0.32	1.00	0.40	1.00	0.40	1.10	0.44	0.90	0.36
6	1.20	0.48	0.80	0.38	1.00	0.48	1.00	0.48	1.02	0.49	0.90	0.43
7	1.40	0.56	0.80	0.45	1.00	0.56	1.00	0.56	1.00	0.56	0.90	0.50
8	1.60	0.64	0.80	0.51	1.00	0.64	1.00	0.64	1.00	0.64	0.90	0.58
9	1.80	0.72	0.80	0.58	1.00	0.72	1.00	0.72	1.00	0.72	0.90	0.65
10	2.00	0.80	0.80	0.64	1.00	0.80	1.00	0.80	1.00	0.80	0.90	0.72

IEEE-693
Alto
Moderado
Bajo

## 6.2 Métodos de Calificación

La Tabla 4 presenta los métodos de calificación sísmica y los numerales del estándar IEEE-693 2018 donde se describe su procedimiento y la Tabla 5 presenta los diferentes métodos de calificación sísmica de acuerdo con el tipo y tensión del equipo.

**Tabla 4. Métodos de verificación sísmica según IEEE 693-2018**

SEISMIC QUALIFICATION METHODS	ACCORDING WITH
Time history shake-table test qualification	A.1.2
Static pull test method	A.1.3
Static analysis method	A.1.4.5
Static coefficient method	A.1.4.6
Dynamic response spectrum analysis	A.1.4.7
Time history dynamic analysis method	A.1.4.8
Inherently acceptable	A.1.5



Comité de estudios subestaciones e instalaciones eléctricas  
Grupo de trabajo Ingeniería Civil

Fecha: 07-06-2019

Tabla 5. Métodos de verificación asociados a los Equipos según IEEE 693-2018

EQUIPMENT	AN	SEISMIC QUALIFICATION METHODS				
<b>CB</b>	C	> 550 kV: By DL shake-table testing	170 - 550 kV: By PL shake-table testing	123 - 170 kV: By dynamic analysis	38 - 123 kV: By static coefficient method	< 38 kV: By I.A.
<b>Tank internals and attachments of Transformers &amp; Reactors</b>	D				> 34,5 kV: By static analysis	< 34,5 kV: By I.A.
<b>Bushings</b>	D		> 138 kV: By PL time history shake table test		34,5 – 138 kV: By static pull test	< 34,5 kV: By I.A.
<b>DS</b>	E		> 170 kV: By PL shake-table testing	123 - 170 kV: By dynamic analysis	38 - 123 kV: By static coefficient method	< 38 kV: By I.A.
<b>CVT, CCVT, VT, CT &amp; SSVT</b>	F		> 230 kV or having a total equipment height $\geq 6,1m$ : By PL time history shake testing	69 - 230 kV: By dynamic analysis	35 - 69 kV: By static coefficient analysis	< 35kV: By I.A.
<b>Air Core Reactor</b>	G			> 115 kV: By dynamic analysis	35 - 115 kV: By static coefficient analysis	< 38 kV: By I.A.
<b>Circuit Switcher</b>	H	> 550 kV: By DL shake-table testing	170 - 550 kV: By PL shake-table testing	123 - 170 kV: By dynamic analysis	38 - 123 kV: By static coefficient method	< 38 kV: By I.A.
<b>Suspended Equipment</b>	I				Static analysis	



Comité de estudios subestaciones e instalaciones eléctricas  
Grupo de trabajo Ingeniería Civil

Fecha: 07-06-2019

EQUIPMENT	AN	SEISMIC QUALIFICATION METHODS				
Batteries	J		Non-rigid racks of three or more stacks: By time history	Non-rigid racks of two stacks: By dynamic analysis	Rigid racks and all racks of one stack: By static analysis	
SA	K		> 90 kV DCV: By PL time history shake-table testing	54 - 90 kV DCV: By dynamic analysis	35 - 54 kV DCV: By static coefficient analysis	< 35kV DCV: By I.A.
Cable Terminator (Pothead)	N	> 500 kV: By DL shake-table testing	230 - 500 kV: By PL shake-table testing		35 – 230 kV: By static pull test	< 35 kV: By I.A.
Series Capacitor & Shunt Capacitor	O			> 230 kV: By dynamic analysis	38 - 230 kV: By static coefficient analysis	< 38 kV: By I.A.
GIS	P		> 170 kV: By PL time history shake-table testing	123 - 170 kV: By dynamic analysis	38 - 123 kV: By static coefficient analysis	< 38 kV: By I.A.
Composite & porcelain insulator	R		Doesn't apply	Doesn't apply	Doesn't apply	Doesn't apply
HVDC Equipment	V	Table V.1 & Table V.2	Table V.1 & Table V.2	Table V.1 & Table V.2	Table V.1 & Table V.2	Table V.1 & Table V.2
Equipment with seismic protective devices	W					

Nota: La definición de "kV" para cada tipo de equipo es definido en el anexo correspondiente de la IEEE 693-2018.

### Convenciones de la Tabla 5:

CB: Circuit breaker

DS: Disconnect switches

CVT: Capacitor voltage transformer

CCVT: Coupling capacitor voltage transformer

VT: Voltage transformer

CT: Current transformer

SSVT: Station service voltage transformer

SA: Surge Arrester

GIS: Gas-Insulated Switchgear

DL: Design level

PL: Performance level

I.A.: Inherently Acceptable

### 6.3 Criterios y Conceptos Básicos

En el presente capítulo se presentan los criterios y conceptos básicos de la versión 2018 de la IEEE-693, se incluyen algunos cambios relevantes con respecto a la versión 2005 del estándar en cuestión.

#### 6.3.1 Required response spectrum, RRS

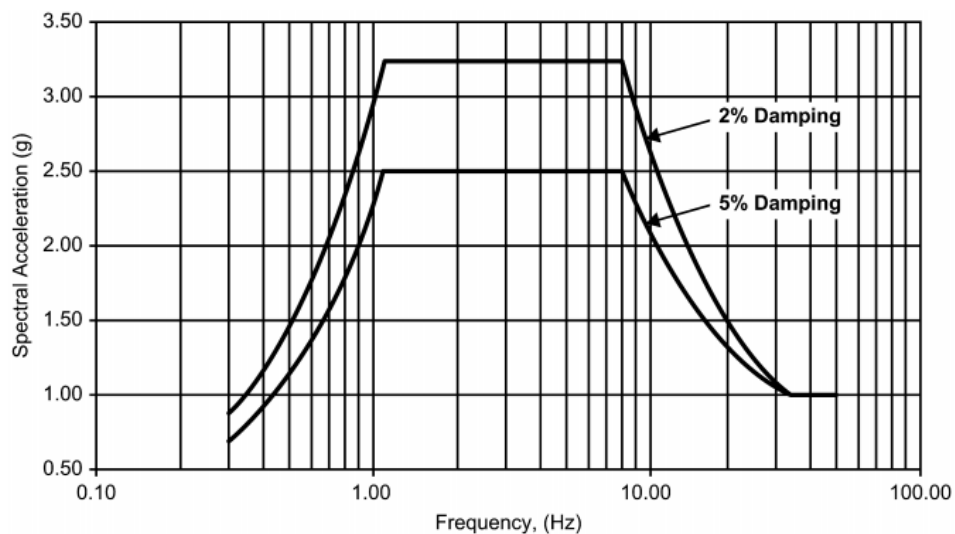
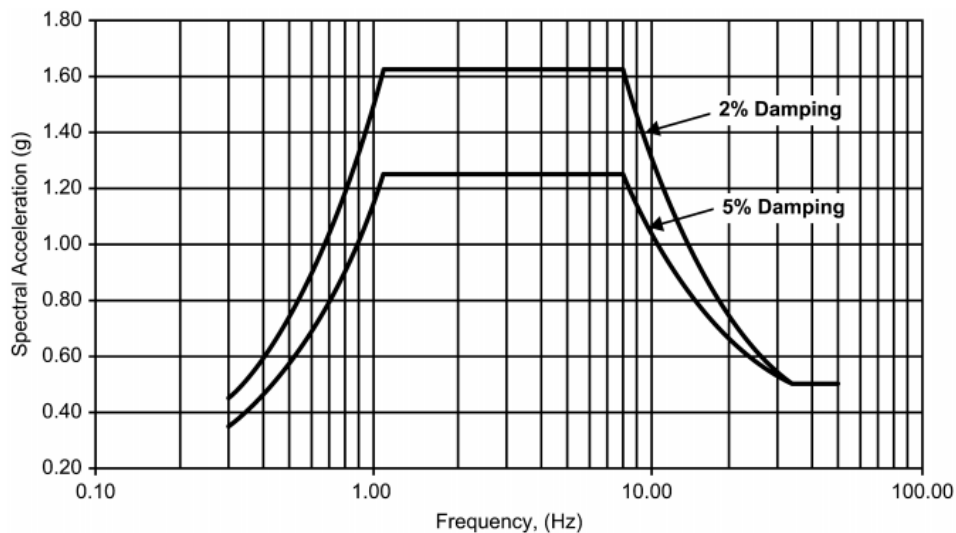


Figura 2. High performance required response spectrum, 1 g. Tomado de Figure A.1 de IEEE-693 2018



**Figura 3. Moderate performance required response spectrum, 0,5 g. Tomado de Figure A.2 de IEEE-693 2018**

### 6.3.2 Performance Level; PL

Se describen las características del uso del PL:

- Se aplica a ensayos de mesa vibratoria, no es aplicable a métodos analíticos de escritorio. Ver 5.3.4 de IEEE-693 2018.
- El amortiguamiento (damping) a usar es 5 % del RRS, ver numeral 5.6.4 de IEEE-693 2018.

### 6.3.3 Design Level; DL

Se describen las características del uso del DL:

- Usa la mitad de los valores del RRS, el cual está dado en términos de PL, ver 5.3.5 de IEEE-693 2018. El amortiguamiento (damping) a usar es 2 % del RRS, ver numeral 5.6.2 de IEEE-693 2018. En caso de usar un amortiguamiento diferente, se debe justificar valor producto de métodos descritos en A.1.1.6 de IEEE-693 2018.

### 6.3.4 Cargas de terminales y cables

El “Time history shake-table test qualification” debe considerar las masas de terminales descrito en A.1.2.3 y los efectos del conductor descritos en A.1.6.

El “Analysis qualification” debe considerar las masas de terminales descrito en A.1.4.2 y los efectos del conductor descritos en A.1.6.

### 6.3.5 Estructura soporte

En la verificación sísmica se debe considerar el efecto de la estructura de soporte. En caso de no considerarse en el modelo de análisis, el espectro de respuesta debe ser amplificado por un factor de 2.5 de acuerdo con lo estipulado en el numeral 5.10.4 de IEEE-693 2018. Los diferentes eventos de la influencia de la estructura soporte en la verificación sísmica son abordados en el numeral 5.10.

### 6.3.6 Efectos de dirección

El “Analysis qualification” en lugar de usar SRRS de los tres componentes ortogonales, se debe usar la regla de combinación de 100/40/40 descrita en el numeral A.1.4.4, la cual debe ser analizada en la dirección de mayor criticidad para el modelo.

### 6.3.7 Criterio de resistencia sísmica del aislador

La resistencia sísmica del aislador o buje debe seguir los criterios establecidos en el anexo X de IEEE-693 2018, se incluye allí el criterio de “shed seal type test” descrito en X.9.5 que aplica para los aisladores compuestos

## 6.4 Criterios de aceptación

### 6.4.1 Criterios de aceptación de DL

Los criterios de aceptación de equipos, estructuras de anclaje y pernos de anclaje por medio de design level; DL, se presentan en el numeral A.2.1.1 y A.2.1.2 de IEEE-693 2018.

### 6.4.2 Criterios de aceptación de PL

Los criterios de aceptación de equipos, estructuras de anclaje y pernos de anclaje por medio de performance level; PL, se presentan en el numeral A.2.2 y A.2.4 de IEEE-693 2018.

### 6.4.3 Criterios de aceptación de Static Pull Test

Los criterios de aceptación de equipos static pull test, se presentan en el numeral A.2.3 de IEEE-693 2018.

## 6.5 Criterios de verificación por grupo

Cuando se tenga previsto calificar sísmicamente un equipo haciendo uso del “Método de grupo”, se deberá cumplir lo establecido en el numeral 4.7 de la IEEE 693-2018.

En caso de que el CONTRATANTE hiciera objeciones al mérito técnico del procedimiento usado para la verificación por el Método de Grupo, el Fabricante y el CONTRATANTE harán una revisión del análisis realizado para determinar si es posible resolver las objeciones. Si no es posible resolverlo, la verificación por el Método de Grupo no se puede utilizar y, en consecuencia, la verificación del cumplimiento de los requisitos sísmicos del equipo deberá ser realizada por el Fabricante de acuerdo con lo señalado en el primer párrafo del presente numeral.



Comité de estudios subestaciones e instalaciones eléctricas  
Grupo de trabajo Ingeniería Civil

Fecha: 07-06-2019

## **6.6 DOCUMENTACIÓN REQUERIDA**

El documento de verificación sísmica de cada equipo deberá incluir la información requerida en el numeral A.6 y los anexos S y T de IEEE-693 2018.

Adicionalmente se requiere la placa de identificación de la verificación de acuerdo con el numeral A.7 de IEEE-693 2018.



## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Chopra, A.K., 2014. “Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering”, Fourth edition, 2014.
- [2] IEEE 693, 2018. Recommended Practices for Seismic Design of Substations.
- [3] NSR-10, 2010. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente.
- [4] AIS-180-13 “Recomendaciones para requisitos sísmicos de estructuras diferentes de edificaciones”.