

2) ESTUDIO DE CASO "PARA UNA APARAMENTA DE BAJA TENSIÓN

La intención es encontrar el compromiso técnico y económico óptimo para el diseño con una corriente nominal de 630A, corriente de cortocircuito (65 kA rms) y una capacidad de arco interno (65 kA rms durante 0,3 s) teniendo en cuenta lo siguiente:

- El número de aisladores o soportes del sistema de barras colectoras (fuerzas electrodinámicas).
- Tipo de perfiles de barras (ensayo de elevación de temperatura y fuerzas electrodinámicas).
- Usar o no las aberturas de ventilación con un área determinada (prueba de elevación de temperatura)
- El área de alivio de presión y el volumen interno neto (prueba de arco interno)
- El espesor de la placa de la carcasa (soportabilidad a las sobrepresiones)
- Si las barras están hechas de cobre o aluminio.

Los costos de las partes utilizadas para hacer la comparación económica (Tabla 1) varían considerablemente de un país a otro. El análisis económico que se realizó en el software SwitchgearDesign. El método de análisis económica es una simplificación del método completo con la herramienta Decidix. https://www.cognitor.com.br/c_Viabilidad.htm

Consideramos lo siguiente:

- El involucro tiene dimensiones de 1400 x 700 x 220 mm (Figura 1)
- Las dimensiones de las barras son las de la Tabla 3.
- La distancia de fase a fase debe permanecer en el rango de 40 a 60 mm.
- Elevación de temperatura: el valor máximo permitido en cualquier punto es de 65K pero podría ser 60K o 75K [6]. Hay algo de disipación de energía dentro del gabinete (150 W) además de las pérdidas de energía originadas por la circulación de la corriente en las barras e interruptor. Están relacionados con algunas pérdidas internas, incluidas las conexiones entre barras y otras. El interruptor (CB) tiene una resistencia eléctrica de 20 $\mu\Omega$ por fase, como se ve desde los terminales [25].
- Fuerzas electrodinámicas de cortocircuito [26] : la tensión mecánica máxima aceptable es $Q \times \sigma \times 0.2$ como se usa en IEC61117 - Un método para evaluar la resistencia de cortocircuito soportada de PTTA e IEC 60865-1 - Corrientes de cortocircuito. Valores utilizados para σ 0.2: 250N / mm² (cobre) o 120N / mm² (aluminio)
- Sobrepresiones de arco interno [27] : el involucro es hecho de una placa de acero con un espesor definido y la construcción es tal que la sobrepresión máxima aceptable, sin fallar en la prueba, es del 100% (1,0 bar) por encima de la presión atmosférica. Los criterios de prueba son los que figuran en el documento IEC TR 61641 (2008) - Ensamblajes de interruptores de baja tensión incluidos - Guía para realizar pruebas en condiciones de formación de arco debido a una falla interna

<p>Figura 1a - El estudio de caso</p> <p>Net fluid volume = $L \times H \times W \times \text{occupation factor}$</p> <p>$D1 = \text{distance phase to phase}$</p> <p>$S1 = \text{Pressure relief area}$</p> <p>$S2 = \text{Ventilation area in steady state (with a dispositive to close during internal arc)}$</p> <p>Copper busbar with N bars of cross section AAxBB per phase</p> <p>$D2 = \text{distance between subsequent insulators}$</p> <p>1 conductor span circuit breaker resistance seen from terminals</p> <p>Resistor to generate distributed internal Watts beyond the ones generated in the busbar and contact resistances(ex. functional units of a LV switchgear)</p>	<p>Figure 1b – El involucro 1400 x 700 x 220 mm</p> <p>Emergency operation In case there is a failure inside hot gasses and overpressure is produced . The meta foam may serve as a heat absorber reducing the external flow of hot gasses</p> <p>Air flow out without or sometimes with an exhaustor (normal operation)</p> <p>Source of heat (Watts) which heats the air (normal operation)</p> <p>Air flow in with natural convection (some filtering effect needed but with a resistance to the circulation as low as possible) (normal operation)</p>
<p>Figura 2a - Configuración para elevación de temperatura. (la fuente de calor principal es el interruptor de circuito)</p>	<p>Figura 2a - Configuración para prueba de cortocircuito (menores distancias fase-fase = fuerzas más grandes)</p>

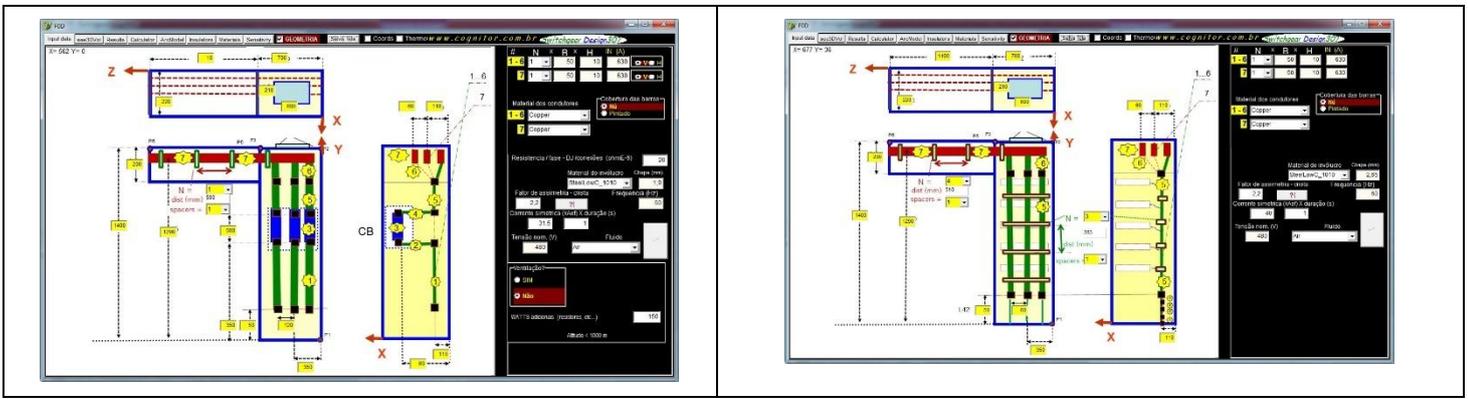


Tabla 1 - Datos de entrada y orden de magnitud de los costos utilizados para la comparación económica.

Ítem	Unidad del costo	Especificación (dimensiones AA x BB)	Orden de magnitud en U \$ D por unidad de costo.	Figura típica
Barra de cobre (*)	U\$ / KG (material)	50x5 mm o 50x10 mm	10 10	
Barra Aluminio (*)	U\$ / KG (material)	80x5 mm o 800 x 10 mm	2,5 2,5	
Aisladores	U\$ / unidad	Epoxi type 15 kv	13	
Aisladores	U\$ / unidad	Epoxi type 600V	2	
Soportes de barra	U\$ / unidad	Baja tensión para altas fuerzas electrodinámicas.	3	
Involucro	U\$ / kg (montada)	Placa 1,90 mm	2	
Dispositivo alivio de presión	U\$ / unidad	Discos de ruptura	30	
Pequeño ventilador + dispositivo para cerrar la abertura de ventilación.	U\$ / unidad		150	Pequeño "fan" para producir 0,5 m / s + dispositivo.
Montaje	U\$ / unidad (horas de trabajo)	Baja o media tensión	250	Montaje excluyendo los artículos cubiertos arriba
Pintura de barras	U\$ / m ²		5	

(*) Los valores en 2013 son de 7 a 8 y de 1,8 a 2 U \$ D / kg.

3. ESTRATEGIAS PARA REDUCIR LAS FALLAS EN LAS PRUEBAS SIN SOBREDIMENSIÓN

Es una práctica común sobre dimensionar el diseño para evitar el riesgo de fallas en las pruebas de laboratorio. Para considerar este aspecto en nuestro estudio de caso, comparó cuánto costaría el equipo si estuviera diseñado para cumplir con los límites reconocidos de la soportabilidad para esa prueba y cuánto costaría si se diseñara con un margen de seguridad del 25% (consulte la Tabla 2). Muchas otras estrategias son posibles dependiendo del grado de confianza asignado al método de simulación.

Tabla 2 - Límites de soportabilidad y estrategias para reducir la posibilidad de fallas en las pruebas.

Test	Efecto y punto crítico considerado	Estrategia para reducir la posibilidad de fallas en las pruebas (Nota 1)	Límite comúnmente utilizado (100%)	Sobredimensionamiento Límite con ~ 25% de margen de seguridad
Prueba de resistencia a la corriente de corta duración	Tensión en el conductor	Reduzca la distancia entre los aisladores posteriores manteniendo la distancia de fase a fase	Q x 250 N/mm ² para cobre Q x 120 N/mm ² para aluminio	Q x 0.75 * 250 =qx187 N/mm ² o 0.75 * 120 =90 N/mm ²
Prueba de resistencia a la corriente de corta duración	Máximas fuerzas de flexión en cualquiera de los aisladores.	Igual que el anterior	10000 N en flexion, tension o compression	7500 N
Prueba de aumento de temperatura	El aumento de temperatura en una conexión plateada del dispositivo	Aumentar la sección de barras. o pintar la barra o aumentar la ventilación	65 K	50 K
Pruebas de arco interno	Sobrepresión doble la placa creando una abertura desde donde salgan gases calientes	para reducir la distancia entre los puntos de fijación o para aumentar el espesor de la placa. Ampliar el tamaño de los dispositivos de alivio de presión.	2 mm 90% del pico de sobrepresión (sin considerar la integral de la curva de sobrepresión)	1,5 mm

Nota: El factor para las tensiones electrodinámicas es q x σ 0.2 en IEC 60865

4. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO PARA LA PRUEBA DE ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

El primer paso es estimar el tamaño de las barras de cobre o aluminio desnudas que se utilizarán. Buscando en alguna tabla de barras publicada en manuales de ingeniería, encontramos que la corriente que se puede aplicar en aire libre tiene una elevación de temperatura de 35 K por encima de la temperatura ambiente del aire de 35°C. Como la temperatura del aire dentro del equipo es más alta que la externa, estas tablas solo sirven para proporcionar un orden de magnitud. Las pérdidas adicionales causadas por las resistencias de contacto y otras pérdidas de potencia traerán la necesidad de una barra más grande.

Inicialmente, calculamos la elevación de temperatura del aire dentro del involucro (aire interno) en función del total de vatios internos, las dimensiones y el área de las aberturas de ventilación considerando recursos como ventiladores. El método es el de IEC TR 60890 con algunas adiciones para los ventiladores que no están cubiertos allí. Conociendo $\Delta T_{\text{aire interno}}$, utilizamos, además, un método de volumen finito para calcular la elevación de temperatura de los conductores y sus contactos por encima de esta temperatura interna del aire ($\Delta T_{\text{conductor}}$). La elevación de temperatura final que se comparará con los resultados de las pruebas de laboratorio es

$$\Delta T_{\text{simulación}} = \Delta T_{\text{aire interno}} + \Delta T_{\text{del conductor}}$$

Para verificar el impacto de las diferentes alternativas de diseño, simulamos una prueba de elevación de temperatura para encontrar el valor de la corriente que produciría la elevación de temperatura de 65K y también el 75% de 65K (~ 50K) en el punto de conexión (conexión del interruptor automático a la barra de autobuses). Los valores se muestran en la Tabla 3.

Para simplificar, consideraremos el diseño óptimo como el que tiene el menor costo por potencia transmitida. La potencia transmitida se consideró $TP = 1,732 * \text{tensión nominal fase a fase} * \text{corriente}$ en la Tabla 3.

Tabla 3: Alternativas de diseño X costo para elevación de temperatura del punto caliente 65K (sin margen de seguridad) o 50K (con margen). Resistencia CB 20 $\mu\Omega$ más una resistencia de 150W. Área de ventilación = ninguna o 100 cm²

Case #	Busbar dimensions (mm)	Bare or painted (Note 1)	Air speed (m/s) (Note 2)	Ventilation opening area (cm ²)	Current (A) for 65K Temp. rise	Cost / transmitted power 65K (USD / KVA)	Current (A) for 50K Temp. rise	Cost / transmitted power 50K (USD / KVA)
1	1 x (50 x10) Copper	bare	0 (no vents)	No vents	630	1,5	450	2,1
1	2 x (50 x 5) Copper	bare	0 (no vents)	No vents	690	1,4	500	1,9
2	1 x (50 x10) Copper	Painted	0 (no vents)	No vents	680	1,4	510	1,8
2	2 x (50 x 5) Copper	painted	0 (no vents)	No vents	710	1,3	535	1,8
3	1 x (50 x10) Copper	bare	< 0,1 (vent/no fan)	100	830	1,2	670	1,4
3	2 x (50 x 5) Copper	bare	< 0,1 (vent/no fan)	100	1000	1,0	780	1,2
4	1 x (50 x10) Copper	bare	0,55 (vent + fan)	100	1175	0,9	1000	1,1
4	2 x (50 x 5) Copper	bare	0,55 (vent + fan)	100	1350	0,8	1100	1,0
8	2 x (80 x 5) Aluminum	bare	0 (no vents)	No vents	745	0,9	530	1,2
9	Web channel 100xx4	bare	0 (no vents)	No vents	1000	0,7	745	0,9

Nota 1 - Pintado o utilizando una cubierta termoplástica.

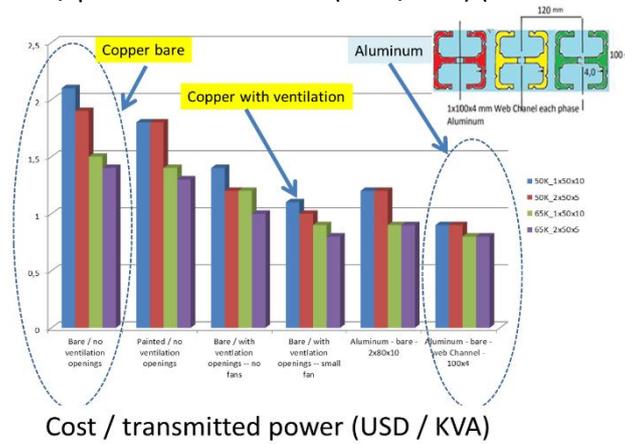
Nota 2 - Sin ventilación = sellado *** Ventilaciones + sin ventilador = abertura de ventilación de 100 cm² sin filtro y sin ventilación forzada

*** Ventilaciones + ventilador = abertura de 100 cm² con filtro y ventilación forzada con extractor.

Nota 3 - barra 1x50x10 mm cobre - Catálogo de corriente nominal para 35 K = 852 A

Nota 4 - barra de aluminio de 2x80x5 mm - Corriente nominal del catálogo para 35 K = 1150 A

Figura 2 - Comparación de los costos / potencia transmitida (USD / kVA) (ELEVACIÓN DE TEMPERATURA)



5. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO PARA LA PRUEBA DE CORRIENTE DE CORTA DURACIÓN (FUERZAS ELECTRODINÁMICAS)

Para optimizar el diseño de las fuerzas electrodinámicas hacemos:

- La reducción del número de aisladores o soportes en las barras.
- la reducción de la sección transversal de la barra, manteniendo la rigidez mecánica y atendiendo los requisitos de elevación de temperatura
- Modificación de la distancia de fase a fase respetando la soportabilidad dieléctrica.

En los cubículos de MT, los aisladores no suelen habilitar optimizaciones a diferencia de los embarrados y aparamentos de baja tensión. Cambiar la distancia entre fases puede ser interesante porque:

- Utilizando distancias más grandes, reducimos las fuerzas y permitimos una distancia más grande entre espaciadores. Para las aparamentos de baja tensión tenemos, además, un impacto favorable en la reducción de la corriente del arco interno. Para voltajes más bajos, la resistencia del arco tiene un impacto importante para reducir la corriente del arco. Una solución interesante es crear un producto de "seguridad intrínseca" utilizando grandes distancias que harán que el arco se apague automáticamente en poco tiempo. El enfoque en la reducción del tamaño del equipo con frecuencia es un error de la estrategia de diseño. Dentro de la plataforma petrolera en alta mar, para reducir el tamaño y el peso es muy importante. Por el contrario, para reducir 100 mm en el ancho del equipo de distribución instalado en una sala de 20x10 metros, en una gran industria es solo una fuente de problemas debido al mayor calentamiento, las sobrepresiones y las fuerzas electrodinámicas.

- Si la distancia entre las fases es menor, la impedancia es menor. Para un centro de control de motores de baja tensión (MCC), esto no es muy relevante, pero para una vía de bus que atraviesa 40 pisos, reducir la caída de voltaje es muy positivo.

Tabla 3: Diseño de alternativas / costos para la optimización de las fuerzas electrodinámicas (65 kA rms x 143 kAcr).

Case #	Busbar dimensions (mm)	Distance between centers of phases (mm)	Maximum distance between supports (mm) for q x 250 N/mm2	Cost / transmitted power q x 250N/mm2 (USD / KVA)	Maximum distance between supports (mm) for q x 187 N/mm2	Cost / transmitted power q x 187N/mm2 (USD / KVA)
1	1 x (50 x10) Copper	60	~260	1,07	230	1,10
2	2 x (50 x 5) Copper	60	210	1,21	144	1,31
3	Web channel 100xx4	60	Note 1	Note 1	Note 1	Note 1
1	1 x (50 x10) Copper	120	~380	1,04	290	1,07
2	2 x (50 x 5) Copper	120	210	1,21	192	1,24
3	Web channel 100xx4	120	900	0,72	1100	0,68

Nota 1: no es posible debido al espacio necesario de ~ 120 mm fase a fase, ya que la sección transversal externa del perfil es de 100x100 mm

En nuestro estudio de caso, el valor de la corriente de cortocircuito es fijo y buscamos la distancia máxima posible entre los soportes de la barra vertical sin pasar la tensión mecánica máxima aceptable en la barra ($\sigma \times 0.2$ en IEC 60865). Esta distancia máxima significa el número mínimo de apoyos. Una tensión mayor que esto produciría deformaciones visibles después de la prueba, lo cual no está permitido. La idea es economizar apoyos suficientemente buenos para soportar las fuerzas resultantes de compresión, tensión y flexión. Para mostrar el impacto de las diferentes alternativas de diseño, simulamos las alternativas en la Tabla 3.

6. ENCONTRANDO LA SOLUCIÓN PARA LA PRUEBA DE ARCO INTERNO

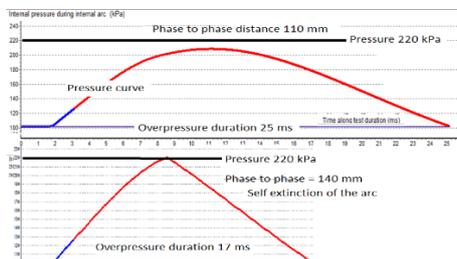
Es fácil construir dispositivos utilizando el concepto de "arco libre", pero existe una cierta resistencia de los diseñadores que se centran en el paradigma de que "lo pequeño es mejor". Demostremos la diferencia entre proyectos con o sin autoextinción. La sobrepresión es el parámetro clave. Depende de la tensión aplicada y la corriente de arco, el volumen presurizado y el área y la velocidad del dispositivo de alivio de presión. El arco comienza en un lugar determinado y se mueve en dirección opuesta a la fuente de voltaje. Hay tres efectos impactantes.

El primer efecto es la sobrepresión causada por la vaporización del material conductor. Puede dañar las puertas de la caja o causar la deformación de las paredes. La resistencia mecánica del involucro aumenta con el espesor de la pared. Si la distancia entre los pernos que unen las placas es menor, la deformación de las placas será menor para una presión dada. El segundo efecto es el llamado "burnthrough". Cuando el arco se está moviendo, eventualmente puede detenerse en un perno o una barrera de arco. Si se detiene, el material metálico en el punto donde se está reproduciendo el arco se derrite y vaporiza a altas temperaturas. Cuanto mayor es el espesor de la placa, más tiempo se necesita para crear un orificio desde el cual los gases calientes presurizados podrían salir de la carcasa. Cuando el arco se mueve, causa menos daño, porque se extrae menos material en un punto específico. El tercer efecto es la expulsión de los gases y partículas calientes a través de los dispositivos de alivio de presión que dependen de los valores y la duración de la sobrepresión.

Una estrategia interesante, que puede aportar seguridad intrínseca, es aumentar la distancia de fase a fase para provocar la auto extinción del arco durante la prueba o en la vida real. En la práctica, esto es útil solo para las aparatas de baja tensión porque las distancias involucradas son pequeñas. El uso de distancias reducidas de fase a fase puede ser positivo desde la vista del arco interno, pero es más difícil desde el punto de vista de las fuerzas electrodinámicas. Supongamos que los objetivos son mantener la "Integral de la curva de sobrepresión" por debajo de 20 y el pico de presión por debajo de 2,2 bar para un 65 kA durante 0,3 s. Consideremos que el área de la aleta de alivio de presión es el 90% de la cara superior (630x200 mm). Usemos tres distancias entre los centros de las fases. Ver resultados en la Tabla 4. Es posible ver que forzar la autoextinción puede ser una estrategia bastante interesante.

Tabla 4 - Prueba de arco interno. Área de alivio = 630x200 mm ** Factor de ocupación de volumen = 80% ** LVSW1_1x50x10bare_noV

Case #	Distance between centers of phases (mm)	Short circuit current presumed value (kA rms)	Actual short circuit current due to arc resistance (kA rms)	Overpressure duration (ms)	Maximum overpressure peak (%)	Integral of the overpressure curve along the time (% bar x S)
1	60	65	55,4	20	56	12
2	110	65	49,6	25	106	31
3	140	65	20,0	16	118	17



7. CONCLUSIONES SOBRE EL DISEÑO ÓPTIMO

Dependiendo de los costos atribuidos a cada componente del equipo de distribución como materiales, trabajo de mano de obra, montaje, etc. y los objetivos a alcanzar (seguridad, costo de fabricación mínimo, durabilidad), se pueden seguir diferentes estrategias de diseño para alcanzar el diseño óptimo. Si, en nuestro estudio de caso, solo observamos el parámetro "Costo / Potencia transmitida - USD / KVA" hay una conclusión obvia que es el gran potencial para el uso de perfiles de barras de aluminio mecánicamente más resistentes (Perfil web o 2 x U).

FIN DEL ARTICULO

A respecto del autor Ing. Sergio Feitoza Costa, M.Sc.

C.V: <https://www.cognitor.com.br/Curriculum.html>

Things I helped to do: <https://www.cognitor.com.br/HelpedToDo.pdf>

REFERENCIAS

[1] Libro lectura libre "TABLEROS, APARUMENTAS, CELDAS, CANALIZACIONES Y OTROS EQUIPOS PARA SUBESTACIONES Y LÍNEAS"

Español: http://www.cognitor.com.br/Book_SE_SW_2014_ES.pdf

English https://www.cognitor.com.br/Book_SE_SW_2013_ENG.pdf

Português https://www.cognitor.com.br/Book_SE_SW_2013_POR.pdf

[2] Finding the Optimal Switchgear Design: A comparison between aluminium and copper and an idea of new concept. - Coautores: Sergio Feitoza Costa & Marlon Campos <http://www.cognitor.com.br/DesignOptimization.pdf>

[3,4] Validation of software SwitchgearDesign - Simulation o Tests (Temperature Rise, Short Time Current, Electrodinamic forces, Internal Arc) - Report 071/2014

Español: https://www.cognitor.com.br/TR_071_ESP_ValidacionSwitchgear.pdf

English: https://www.cognitor.com.br/TR_071_ENG_ValidacionSwitchgear.pdf

and report 150/2024 https://www.cognitor.com.br/TR_150_ENG_ValidacionSwitchgearDesignSWD.pdf

[5] Validation of Magnetic & Electric Fields Mapping & Temperature Rise Tests Simulations (Report 074/2014) <https://www.cognitor.com.br/TR074ENGValidationTempRise.pdf>

[6] English version: IEC 61439-1 TEMPERATURE RISE LIMITS: Undefined values distort the low voltage switchgear market - Why it is necessary to rewrite IEC61439-1/2 ?

<https://www.cognitor.com.br/rewriteIEC61439.pdf>

Versão Português "LIMITES DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DA IEC 61439-1: valores indefinidos distorcem o mercado de painéis de baixa tensão <http://www.cognitor.com.br/IEC61439Tabela6.pdf>

[7] IEC62271-307 (2015) - High-voltage switchgear and controlgear - Part 307: Guidance for the extension of validity of type tests of AC metal and solid-insulation enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV.

[8] IEC TR 60943:1998 - Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals. Issued by IEC Technical Committee TC 3

[9] CIGRÈ BROCHURE 602 (2014) Tools for Simulation of The Effects of the Internal Arc in T&D Switchgear,

[10] CIGRÈ BROCHURE 740 (2018) Contemporary design of low-cost substations in developing countries.

[11] CIGRÈ BROCHURE 830 (2021) – "SIMULATIONS FOR TEMPERATURE RISE CALCULATION". (Sergio Feitoza Costa is co-author)

[12] ENVIRONMENTAL EFFICIENCY CERTIFICATE OF ELECTRICAL PRODUCTS (KG/MVA): TECHNICAL STANDARD & DEMO PROJECTS MANAGEMENT) <http://www.cognitor.com.br/demo1certificate.pdf>

[13] Other Technical Articles by Sergio Feitoza Costa: <https://www.cognitor.com.br/Downloads1.html>

[14] IEC/TR 60890, A method of temperature-rise verification of low-voltage switchgear and controlgear assemblies by calculation

[15] M. Kriegel, X. Zhu, H. Digard, S. Feitoza, M. Glinkowski, A. Grund, H.K. Kim, J. Lopez-Roldan,

P. Robin-Jouan, L. Van der Sluis, R.P.P. Smeets, T. Uchil, D. Yoshida, Simulations, and calculations as verification tools for design and performance of high-voltage equipment, CIGRE WG A3.20, CIGRE session Paris, paper A3.210, 2008

[16] IEC 61117, Method for assessing short-circuit withstand strength of partially type tested assemblies (PTTA)

[17] IEC 60865-1, Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods.

[18] IEC TR 60865-2, Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 2: Examples of calculation.

[19] CIGRE WG A3.24, 602 / 2014 Tools for the Simulation of The Effects of the Internal Arc in T&D Switchgear.

[20] IEC 60112, Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials

[21] IEC 60071-1, Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles, and rules

- [22] Capacitation <https://www.cognitor.com.br/trainingESP.pdf>
- [23] Analice del diseño <https://www.cognitor.com.br/propuesta.pdf>
- [24] TRIAXIAL high current AIS - GIS: disclosing an idea worldwide use for lower cost systems.
http://www.cognitor.com.br/Post_01_2019_SergioFeitoza_Triaxial.pdf
- [25] Desarrollo de interruptores de baja tensión <https://www.cognitor.com.br/LVcircuitBreakerDevelopment.pdf>
- [26] Short circuit electrodynamic forces & stresses <https://www.cognitor.com.br/trainingweek4.pdf>
- [27] Internal arc tests <https://www.cognitor.com.br/trainingweek3.pdf>

