

VALIDAÇÃO DE SIMULAÇÕES DE ENSAIOS DE ARCO INTERNO, DE FORÇAS ELETRODINÂMICAS E DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM PAINÉIS E BARRAMENTOS (e partes do código-fonte) .

Autor:
Sergio Feitoza Costa

Empresa:
COGNITOR – Consultoria, P&D e Treinamento Ltda.

Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br Site : www.cognitor.com.br

Palavras chave: Validação, Normas IEC, Painéis, Quadros, Barramentos, Ensaios, Laboratório, Alta Potencia, simulações, Testes, Arco Interno, Forças Eletrodinâmicas, Elevação de temperatura, Correntes de curta duração e de crista

1) INTRODUÇÃO

Técnicas de simulação de ensaios em equipamentos elétricos são usadas para prever resultados de ensaios a baixo custo. Isto é particularmente verdadeiro quando os resultados da simulação são analisados por pessoas que sabem, por experiência prática anterior, os resultados esperados.

É difícil verificar se os resultados da simulação de ensaios são verdadeiros ou falsos porque há um grande numero de dados de entrada e os relatórios de ensaios feitos em laboratórios não identificam muitos destes dados. Por esta razão, o modelo de simulação deve ser tão simples quanto possível.

O foco deste artigo é mostrar informações que permitam que outras pessoas o utilizem, para validar suas simulações.

Com base na experiência em ensaios de alta potência, em projetos de laboratórios e equipamentos de subestações e normalização técnica o autor do artigo desenvolveu uma ferramenta computacional para a simulação de ensaios. A ferramenta é útil para ao desenvolvimento e otimização de projetos reduzindo o risco de que o equipamento falhe durante os caros testes de laboratório.

No artigo são mostrados resultados da validação de simulações para os principais ensaios aplicáveis a painéis e barramentos de alta, média e baixa tensão que são:

- Arco interno (efeitos de sobrepressões)
- Correntes suportáveis de curta duração e de crista (efeitos de forças eletrodinâmicas)
- Elevação de temperatura.

São apresentadas também, para interessados em desenvolver programas de calculo as partes principais de um código-fonte em Delphi. Nos links Internet abaixo há as partes principais do código utilizado no software do autor. A intenção é ajudar as pessoas interessadas no desenvolvimento de software de simulação para reduzir o tempo de desenvolvimento.

http://www.cognitor.com.br/ElectrodynamicalForces_code.pdf
http://www.cognitor.com.br/InternalArc_code.pdf

No Anexo I são descritos os fundamentos dos ensaios.

© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a pagina WEB www.cognitor.com.br Artigo: “Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)”. Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

O objetivo com as simulações é obter resultados, mais ou menos 5 a 10% daqueles resultados reais obtidos nos testes de laboratório. Isso é suficiente para fins de projeto já que os erros de medições de sobrepressões, de forças eletrodinâmicas ou mesmo da temperatura do ar interno aos painéis (nunca medidas por laboratórios em ensaios de tipo porque não são pedidas) são maiores.

Simulações de ensaios permitem ganhos muito significativos na otimização dos projetos pois evitam fatores de segurança exagerados, uso excessivo de isoladores e barras. Os fabricantes em geral usam fatores de segurança elevados em seus projetos para evitar ter que repetir ensaios.

Neste artigo, não serão detalhados os métodos de cálculo e equações. A meta é mostrar que os resultados das simulações são muito próximos dos resultados dos ensaios, mesmo com ferramentas caseiras sem a complexidade de um software CFD comercial.

2) A DIFICULDADE DE OBTER RESULTADOS DE ENSAIOS REAIS PARA A VALIDAÇÃO

O primeiro passo para a validação foi tentar obter vários relatórios de ensaios com resultados e dados de entrada que pudessem ser comparados com as simulações.

Mesmo tendo-se em mãos muitos relatórios emitidos em diversos laboratórios será notado por quem trabalha com simulações como são pouco reproduzíveis diversos destes ensaios. O motivo é que o equipamento testado não é suficientemente identificado nos relatórios de ensaios por fotos, desenhos e medidas de resistência de contato.

É comum encontrar nos relatórios de ensaios internacionais frases mais ou menos como:

- "Os resultados do ensaio só se aplicam à peça específica que foi testada a responsabilidade de conformidade de um produto com a mesma denominação do que foi testado é do fabricante"
- "O fabricante garante que o objeto testado foi fabricado em conformidade com os desenhos apresentados."

É comum encontrar, p.ex. para ensaios de elevação de temperatura, relatórios com desenhos que não informam sequer a seção reta do barramento utilizado. O usuário deve prestar atenção, quando compra um produto, se o relatório de ensaio apresentado não é de outro produto diferente.

A razão para a "não reprodutibilidade" destes testes é que as normas IEC e ABNT não dão orientações sobre como deve ser feita a identificação do produto testado por desenhos e fotografias.

Por exemplo, em testes de elevação de temperatura deveria ser expressa no relatório de ensaio a área de ventilação física, a elevação de temperatura do ar ambiente interno dentro do painel e a resistência elétrica de contato de disjuntores ou seccionadores (e não apenas a resistência total por fase do painel ou barramento).

Recentemente foi feito algo neste sentido, na revisão da Norma brasileira correspondente a IEC 60282-2 A inclusão de medidas e especificações que fazem o ensaio reproduzível não implica em qualquer custo significativo para o teste.

Em outro artigo do autor intitulado "Painéis, quadros, barramentos: falta algo nas normas IEC e nas especificações de compra dos usuários", que pode ser baixado gratuitamente no site www.cognitor.com.br há sugestões à IEC sobre a questão da reprodutibilidade dos ensaios e também sobre como abrir a possibilidade do uso de simulações como instrumento auxiliar nas

normas IEC. Os relatórios de ensaios disponíveis não eram suficientes para fazer uma comparação 10% confiável entre os resultados da simulação e dos ensaios. As premissas usadas foram as seguintes:

a) Ensaio de elevação de temperatura

Nenhum dos relatórios mostrava simultaneamente as resistências elétricas total e de contato, as áreas de ventilação, desenhos detalhados e as temperaturas finais do ar no interior do equipamento

O documento IEC TR 60890 Ed. 1,0 b: 1987 (método de avaliação da elevação da temperatura, por extrapolação para conjuntos de baixa tensão parcialmente testados - PTTA) mostra porque estas informações são necessárias.

Dois ensaios foram utilizados. O primeiro é um teste feito por um fabricante de barramentos onde são mostrados quase todos os dados de entrada relevantes. O segundo corresponde a um ensaio feito em um painel de média tensão. Ambos foram feitos em laboratórios independentes.

b) Ensaio de arco interno

O estudo de caso corresponde a um ensaio bem sucedido de arco interno em um painel de 15 kV - 31,5 kA – 1s de acordo com a IEC 62271-1. O laboratório mediu fez a medição da pressão interna durante o ensaio. A pressão interna é o fator mais relevante para que o equipamento passe ou não no ensaio. Entretanto a norma IEC não solicita sua medição. O alcance dos gases quentes também é decisivo e difícil de avaliar por simulações.

c) Ensaio de correntes suportáveis de curta duração e de crista (forças eletrodinâmicas em isoladores e tensões mecânicas em condutores)

A validação das simulações deste tipo de teste é difícil de fazer. Laboratórios não medem as forças durante o ensaio pois é complicado e as normas não pedem. O que é verificado após o ensaio é apenas o estado físico dos equipamentos e se não há danos.

A boa aceitação de simulações deste tipo é porque os métodos de cálculo para condutores paralelos são publicados em vários manuais de engenharia como os da ABB, Siemens e são considerados "comprovados pela prática" há décadas.

Na norma IEC 61117 - Um método para avaliar a suportabilidade ao curto-circuito de conjuntos parcialmente testados (PTTA), há orientações sobre como calcular forças e tensões, mas apenas por condutores paralelos. Juntando este método com as equações no anexo válidas para qualquer geometria é possível uma ferramenta de cálculo completa. Isto foi feito pelo autor em sua tese de mestrado e usada para ajudar no projeto de um laboratório de alta potência com correntes de até 300 kA / 750 kA crista. O laboratório ainda hoje está em operação normal.

No documento IEC TR 60865-2 - Curto-circuito - Cálculo dos efeitos - Parte 2: Exemplos de cálculo - há alguns exemplos úteis para verificar os resultados da metodologia. A comparação a ser feita aqui aqui é o estudo de caso lá mostrado nas páginas 19 a 27 da IEC 60865-2 (1994).

O cálculo será feito com os mesmos dados de entrada lá descritos. Olhando com cuidado e aumentando o tamanho das figuras do anexo, é possível ver todos os dados relevantes utilizados nas simulações aqui apresentadas.

© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a página WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

3) VALIDAÇÃO DE SIMULAÇÕES DE ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

3,1) ESTUDO DE CASO 1 – barramento 4000 A (480 V) - 3 x (150 x 10) mm - cobre - horizontal - sem ventilação

Os dados de entrada detalhados são mostrados nas figuras A-1 e A-2 do anexo. Os resultados obtidos são apresentados na Figura A-6 do anexo e na tabela 3-2 Para identificar a posição dos condutores e conexões referidas na tabela veja a Figura A-4.

Tabela 3-1 - Comparação entre a elevação de temperatura (K) para os resultados de testes reais e para os resultados da simulação na Fase B (referência Relatório 67.131 Março de 2009).

Ponto de medição na fase B (central) e elevações de temperatura (K)	Ensaio (K)	Simulação (K)
Conexão no condutor inicial # 2	72,4	75
Barramento no condutor # 3	84,0	82
Conexão no condutor central # 4	83,5	84
Conexão no condutor final # 7 (ponto de curto-circuito)	66,6	74
Lateral do involucro a 50% da altura	30,2	30
Fluido interior próximo ao teto	Não medido	54
Fluido interior a meia altura	Não medido	47
Resistência total por fase = conexões + barras ($\mu\Omega$)	Não medido	31 + 3x7
Resistência por fase das juntas ($\mu\Omega$)	Não medido	3 x 7
Ventilação	Não	
Barramento	Cobre 3 x (150 x 10) mm Horizontal	

3,2) ESTUDO DE CASO 2 – PAINEL DE MÉDIA TENSÃO 15 kV – 2500 A

Os dados de entrada detalhados são mostrados nas figuras A-4 e A-5 do anexo. Os resultados obtidos são apresentados na Figura A-3 do anexo e na tabela 3-1. Para identificar a posição dos condutores e conexões referidas na tabela veja a Figura A-1.

Tabela 3-2 - Comparação entre a elevação de temperatura (K) para os resultados de testes reais e para os resultados da simulação na Fase B (ref. Relatório de ensaio 67735).

Ponto de medição	Resultado do ensaio (K)	Resultado da simulação (K)
Conexão no condutor # 1 (ponto de curto circuito)	47	32
Conexão no final do condutor # 3 (disjuntor -baixo)	57	54
Conexão no final do condutor # 4 (disjuntor -baixo)	64	66
Conexão no final do condutor # 5 (disjuntor - alto)	64	65
Conexão no final do condutor # 6 (disjuntor - alto)	52	53
Conexão no final do condutor # 7 (disjuntor - alto)	32	28
Porta do involucro - disjuntor	5	
Fluido 50% altura – compartimento cabos	Não medido	13
Fluido 50% altura – compartimento disjuntor	Não medido	9
Fluido 50% altura – compartimento barras	15	15
Resistência total por fase ($\mu\Omega$)	66 (sem 2x7)	80 (com 2x7)
Resistência do disjuntor por fase ($\mu\Omega$)	Não medido	33
Ventilação	natural	entrada 150 cm ²
Barramento principal	3 x (100x10) mm	

© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a página WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

Barramento de derivação	2 x (100x10) mm
-------------------------	-----------------

4) VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE ENSAIO DE ARCO INTERNO

Os dados de entrada detalhados são mostrados na figura C-2 do anexo. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras C-3 a C-5 do Anexo e na tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Comparação entre os indicadores de desempenho para os resultados de testes reais e para os resultados da simulação de um painel 15 kV testado para arco interno com 31,5 kA durante 1s. (IAC AFLR) (Relatório de referencia 08-050 – oscilograma ROZV 050U – May 2008).

Parâmetros	Ensaio	Simulação
Corrente presumida kA ef e duração (s)	31,5 – 1s	
Assimetria da corrente	Asymmetric	
Frequência (Hz)	50	
Volume do compartimento sob arco (m ³) x K ocupação	1,026 x 0,53 = 0,54	
Área de alívio de sobrepressão (m ²) x K grade	0,66 x 0,31 = 0,20	
Tensão de arco (V ef)	530	567
Máxima sobrepressão acima da atmosférica ΔP (%)	52	52
Duração da sobrepressão (ms)	42	45
Integral da curva de pressão no tempo (bar*s*1000)	to calculate	13
Tempo para alcançar pico da pressão 100% ΔP (ms)	18	21
Tempo para retornar a 50% do pico da pressão ΔP (ms)	24~26	36
Ventilação	No	
Partes agindo como absorvedores de calor (grades)	Yes	
Barramentos	Copper 1 x (100x10)mm	

5) VALIDAÇÃO DE FORÇAS ELETRODINÂMICAS E TENSÕES MECÂNICAS (ENSAIO DE CORRENTES SUPORTÁVEIS DE CURTA DURAÇÃO E DE CRISTA)

Os dados de entrada detalhados são mostrados na figura B-1 do anexo. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras B-2 e B-3 do anexo e na tabela 5-1. Para identificar a posição dos condutores e conexões referidas na tabela veja a Figura B-1.

Nas Figuras B-5 e B-6 do anexo, há outros dados para o painel 15 da Figura B-4. Os resultados são apresentados na Tabela 5-2.

Tabela 5-1 - Comparação entre as forças e tensões obtidas na referencia e na simulação (Referencia IEC 60865-2 – pg.19-27 (1994) barramento 16 kAef - 30,6 kA crista)

Parâmetro	Ensaio	Simulação
Máxima tensão mecânica σH (N/mm ²)	24,7	25
Máxima tensão mecânica σT (N/mm ²)	16,1	17
Máxima tensão mecânica total σH + σT (N/mm ²)	40,8	42
Máxima força no isolador em compressão ou tensão (N)	-	15
Máxima força no isolador em flexão (N)	1606	1610

Tabela 5-2 - Comparação de forças e tensões obtidas para painel 15 kV – 31,5 kAef – 79,0 kAcr)

Parâmetro	Ensaio	Simulação
Máxima tensão mecânica σH (N/mm ²)	(*)	94
Máxima tensão mecânica σT (N/mm ²)	(*)	18
Máxima tensão mecânica total σH + σT (N/mm ²)	(*)	111
Máxima força no isolador em compressão ou tensão (N)	(*)	8918
Máxima força no isolador em flexão (N)	(*)	5711

© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a pagina WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

(*) O equipamento foi aprovado no ensaio real em um laboratório oficial. Não há nenhuma medida ou cálculo para comparar com os resultados da simulação.

6) COMENTÁRIOS FINAIS.

O objetivo deste trabalho foi o de apresentar uma contribuição para os especialistas envolvidos com simulações de ensaios de arco interno, de elevação de temperatura e correntes de curta duração (forças eletrodinâmicas).

Foram mostrados resultados utilizáveis na validação de métodos de cálculo. A bibliografia existente praticamente não mostra "estudos de caso", com dados completos que permitam comparações entre os resultados de testes reais e os de simulações.

A maioria das normas técnicas internacionais foi originalmente preparada sob a visão "tudo deve ser testado". Esta ideia precisa ser atualizada e o caminho para fazê-lo é forçar uma melhor identificação, nos relatórios de ensaio emitidos por laboratórios de ensaio, do produto é testado.

No futuro, quando isto for conseguido, será muito fácil de entender o poder das simulações. Vários testes serão evitados e muitos fabricantes de pequeno e médio porte se tornarão mais competitivos e teremos produtos elétricos com menores preços.

Produzir produtos elétricos confiáveis e mais baratos também significa otimizar a utilização dos recursos de nosso planeta. A sistematização do uso de simulações nas normas IEC é a maneira mais rápida de fazê-lo e precisamos avançar nessa direção.

O autor deste artigo é o Eng. Sergio Feitoza Costa. Sergio é engenheiro eletricista, M.Sc em Sistemas de Energia e diretor do COGNITOR. O CV detalhado pode ser lido no link http://www.cognitor.com.br/cv_port.htm

Tem 30 anos de experiência em ensaios de alta potência, alta tensão e ensaios de materiais, serviços de P&D, equipamentos elétricos e especificação de sistemas de energia, simulação e operação.

Por muitos anos ele foi o coordenador dos laboratórios do CEPEL tendo atuado em todas as fases de implantação destes laboratórios.

Presidiu o *Technical Committee* 32 da IEC (fusíveis), e hoje coordena a comissão do CB-3 do COBEI / ABNT sobre fusíveis de alta tensão. Coordenou no CB-24 da ABNT a recente revisão das normas a "Proteção contra Incêndios em Instalações de Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica".

Sérgio é membro do Grupo de Trabalho do CIGRÉ Internacional WG A3. 24 - Ferramentas para Simulação de Ensaios de Arco Interno e Correntes Suportáveis de Curto Circuito.

Presta serviços de consultoria e capacitação para fabricantes de equipamentos de alta e baixa tensão (melhoria ou desenvolvimento de produtos através de simulação). Sua experiência inclui também a avaliação técnico-econômica de projetos e formação na maioria das áreas relacionadas à geração, transmissão e distribuição.

Sergio Feitoza desenvolve, para fabricantes, software customizado para o cálculo e simulação de ensaios Para mais informações escreva para sergiofeitoza@cognitor.com.br ou ligue para os telefones indicados na parte superior da página www.cognitor.com.br .

© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado , em todas as vezes, o nome do autor e a pagina WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

ANEXO - INFORMAÇÕES SOBRE ENSAIOS DE ALTA POTENCIA E SUAS SIMULAÇÕES

A) ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

São utilizados para equipamentos de baixas a extra alta tensões e os procedimentos para todos são os mesmos. O equipamento deve ser instalado em uma sala livre de correntes de ar. Aplica-se a corrente nominal até que as temperaturas dos pontos medidos se estabilizem. As elevações de temperatura dos diversos pontos medidos não devem ultrapassar os limites ditados pelas propriedades dos elementos condutores e isolantes. Os limites são apresentados nas normas e se excedidos ocorre envelhecimento precoce ou mesmo a destruição, em curto prazo, do equipamento.

Os dados que afetam os resultados são o valor da corrente elétrica, os materiais utilizados, as resistências de contato, a temperatura do fluido ambiente, a velocidade do fluido e a geometria dos condutores e componentes. As resistências de contato são uma variável conhecida, mas podem também ser estimadas em função da força de contato, materiais e revestimentos.

A validação da simulação é fácil, porque a prova é apenas a medição da temperatura feita no teste de laboratório. Basta fazer, antes do ensaio, a medição das resistências elétricas dos componentes e da geometria e depois comparar os resultados dos testes com os da simulação. O único problema é que as normas técnicas não pedem para que se coloque no relatório de ensaios medições separadas de barramentos e conexões assim como aberturas de ventilação

Figura A-1 – Dados de entrada para um teste em barramento de 4000 A

The screenshot displays the Switchgear BusBar software interface. The main window shows a 3D model of a busbar assembly with dimensions: X=709, Y=217, and a total length of 6895. The model is color-coded (yellow for conductors, blue for supports). A legend indicates 'condutores' (conductors) and 'emendas' (joints). Dimensions in mm are provided for various parts, including a 152x250x151 section and a 350x810 section. The control panel on the right contains the following input data:

Tensão nominal (V)	480	Hertz	60
Corrente curto simétrica (kAef)	50	X	1
X duração (s)			
Fator de assimetria - crista	2,5		
Condutores	B	H	
	3	X	(150 X 10)
Corrente nominal (A)	4000		
Material dos condutores	Copper		
Revestimento das barras	<input checked="" type="radio"/> Nú <input type="radio"/> Pintado	Posição das barras	
Material do invólucro	Chapa (mm)		
	Aluminum		3
Suportes Barras	<input checked="" type="radio"/> Isolador <input type="radio"/> Placa		
	ATIS-72/95 MLT		
Espaçadores no vão (se >1 barra / fase)	1		
Subdivisões (princ. e deriv.)	5		
Max. Distancia cada 2 isoladores (mm)	556		
#1	2	#5	3
#3	3	#4	4
#6	3	#6	3
Fluido	Air	Temp. ambiente (°C)	+40

The bottom control panel includes options for 'Tipo painel' (BMA, BMV, BMR, BMC, BMT, BMTFI, BMT_v, FLEX) and simulation types (ForçasEletrodin., Campo magnetico, Campo electrico, ElevaçãoTemperatura, Arco Interno). The BMT option is selected.

© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a pagina WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

Figura A-2 - Dados de entrada adicionais para teste em um barramento de 4000 A

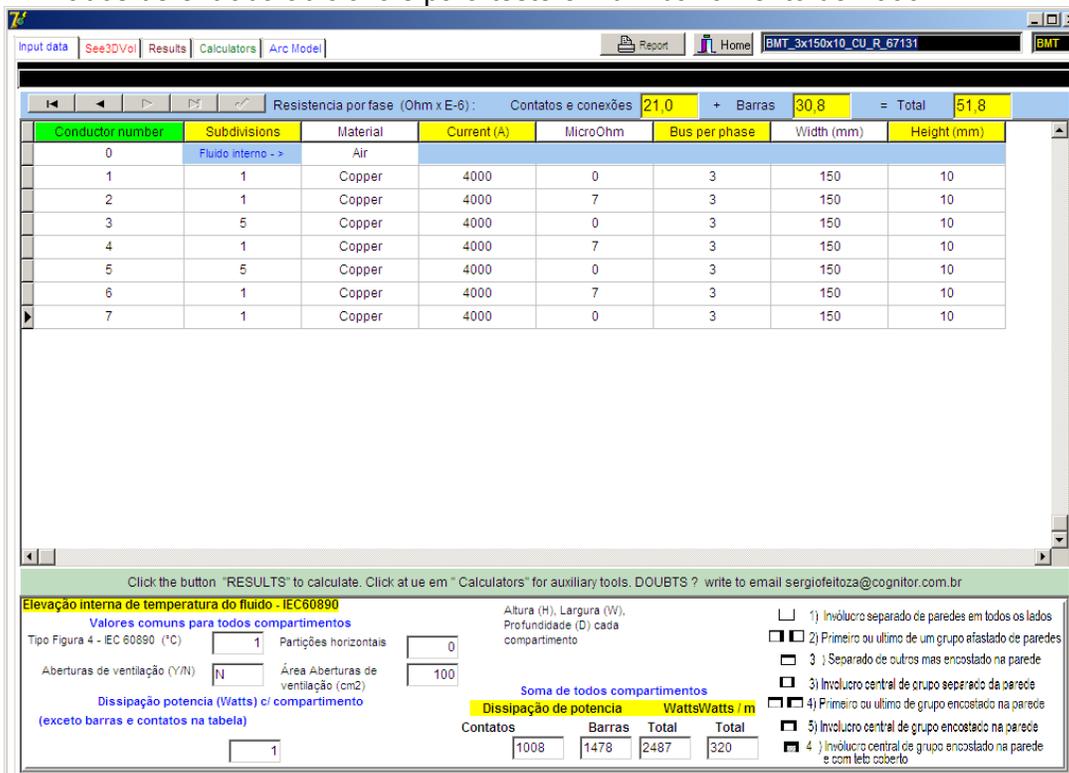


Figura A-3- Resultados da simulação de ensaio de elevação de temperatura em barramento 4000 A



© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a pagina WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

Figura A-4 – Dados de entrada para um teste em painel 15 kV – 2500 A

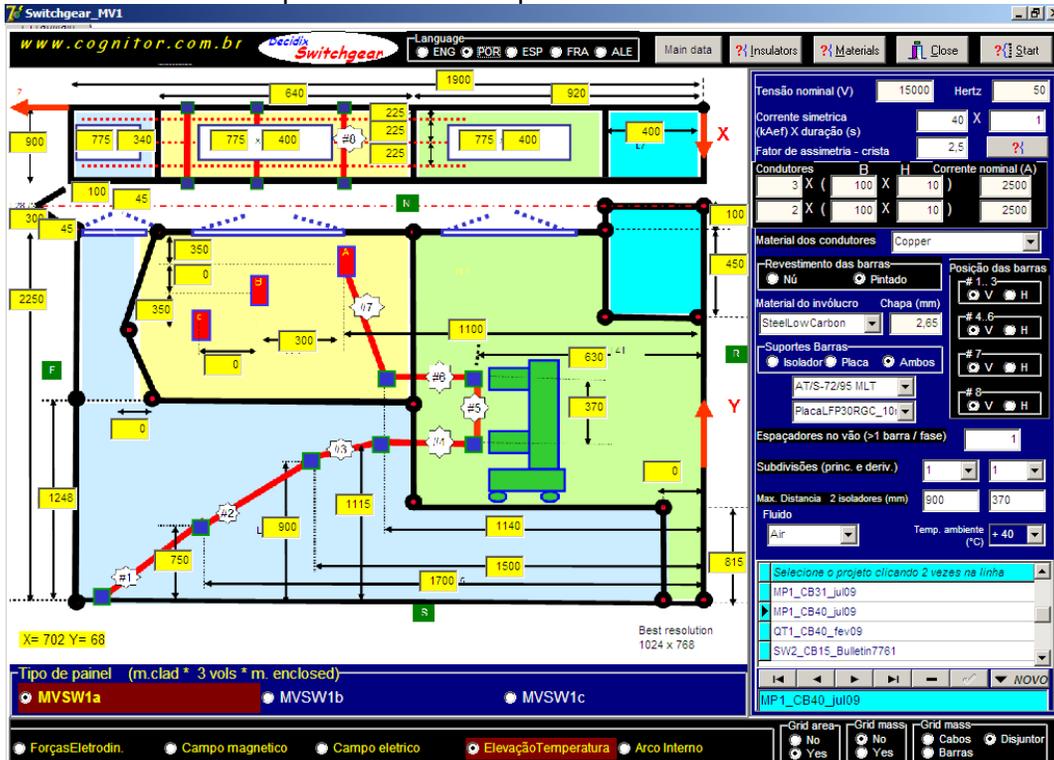
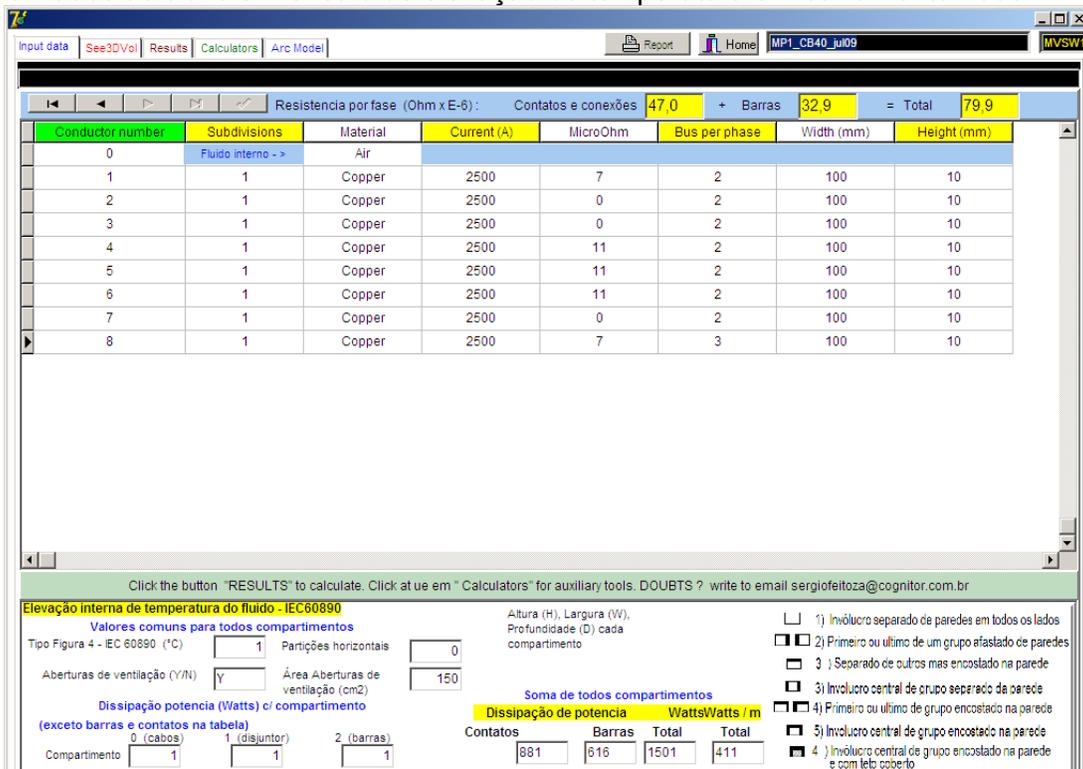


Figura A-5 Dados adicionais - ensaio de elevação de temperatura em barramento 4000 A



© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a pagina WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

Figura A-6 - Resultados - ensaio de elevação de temperatura em painel 15 kV – 2500 A



© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a pagina WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

B) ENSAIOS DE CORRENTES SUPORTÁVEIS DE CURTA DURAÇÃO E DE CRISTA (ESFORÇOS ELETRODINÂMICOS)

Quando ocorre um curto-circuito em equipamentos elétricos consideráveis forças mecânicas podem ser aplicadas nos isoladores e condutores. A temperatura aumenta consideravelmente porque não há tempo para dissipar a elevada quantidade de calor produzido pelo efeito Joule. Os objetivos do ensaio são os de verificar se após um curto circuito não há danos aos isoladores, empenamento de barramentos, quebra de peças ou significativa variação da resistência elétrica.

No que diz respeito aos cálculos para projeto, as forças são calculadas usando expressões como as da Figura B-1. Eu deduzi estas expressões mais de 30 anos atrás, durante minha tese de mestrado. Naquele tempo estávamos projetando os barramentos dos laboratórios de alta potência do CEPEL para correntes de até 300 kA simétricos / 750 kAcr. Depois de calcular as forças "elétricas" é necessário fazer o cálculo das forças de cisalhamento, os momentos de flexão e ter em conta as ressonâncias e outros efeitos.

O objetivo dos cálculos é obter o valor das forças vibratórias agindo em isoladores (compressão, tração e flexão) e também as tensões mecânicas agindo nos condutores. As forças sobre os isoladores deverão ser inferiores aos limites especificados pelo fabricante do isolador de outra forma o isolador pode ser destruído. Estes valores normalmente aparecem nos catálogos do fabricante do isolador. As tensões mecânicas sobre os condutores devem ficar abaixo de determinados limites (por exemplo, 200 N/mm² para o cobre), caso contrário o barramento sofrerá uma permanente e visível flexão.

Os dados que afetam o teste e os resultados de simulações são o valor da corrente de curto-circuito, os materiais envolvidos, a geometria de condutores e isoladores.

Figura B-1 – Forças produzidas pela circulação de corrente em dois condutores vizinhos

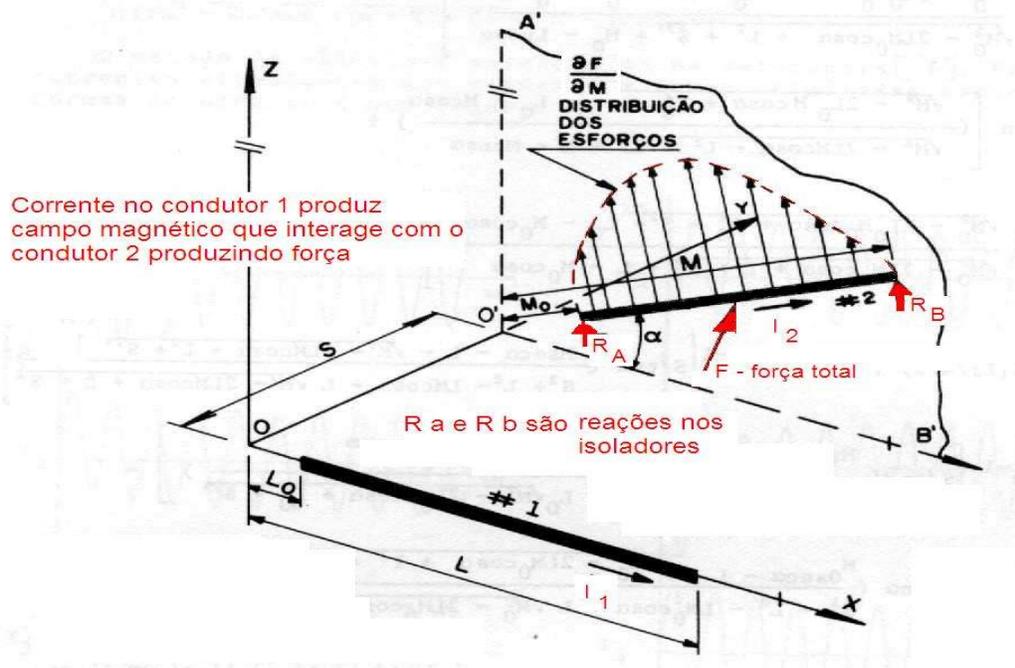


Figure B-1 (continuação)

$$\frac{\partial F_x}{\partial m} = (\mu_0 I_1 I_2 / 4\pi) \cdot \text{sen}^2 \alpha \cdot m \left\{ \left[\frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha}} \cdot \frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L_0^2 + S^2}} \cdot (\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L_0^2 + S^2} + L_0 - m \cos \alpha) \right] - \left[\frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha}} \cdot \frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L^2 + S^2}} \cdot (\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L^2 + S^2} + L - m \cos \alpha) \right] \right\} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial F_y}{\partial m} = -(\mu_0 I_1 I_2 / 4\pi) \cdot \cos \alpha \cdot S \left\{ \left[\frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L_0^2 + S^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L_0^2 + S^2}} \cdot (\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L_0^2 + S^2} + L_0 - m \cos \alpha) \right] - \left[\frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L^2 + S^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L^2 + S^2}} \cdot (\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L^2 + S^2} + L - m \cos \alpha) \right] \right\} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial F_z}{\partial m} = -(\mu_0 I_1 I_2 / 4\pi) \cdot \cos \alpha \cdot \text{sen} \alpha \cdot m \left\{ \left[\frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L_0^2 + S^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L_0^2 + S^2}} \cdot (\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L_0^2 + S^2} + L_0 - m \cos \alpha) \right] - \left[\frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L^2 + S^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L^2 + S^2}} \cdot (\sqrt{m^2 - 2L_0 \cos \alpha + L^2 + S^2} + L - m \cos \alpha) \right] \right\} \quad (3.3)$$

Figure B-2 – Dados de entrada para simulação de ensaio em barramento

The screenshot displays the Decidix 4D_BusBar software interface. The main window shows a 3D model of a busbar assembly with dimensions and coordinate axes (X, Y, Z). The model is yellow and blue, with dimensions like 9000, 1000, and 175. A legend identifies conductors (condutores) and joints (emendas). Dimensions in mm are provided for ventilation area (100x100) and overpressure relief area (190x670). The right panel contains configuration parameters:

- Corrente nominal (A): 1940
- Tensão nominal (V): 10000
- Corrente de curto circuito simétrica (kA ef) e duração (s): 16 x 1
- Fator de assimetria (crista): 1,91
- Condutores: 3 x (60 x 10)
- Material dos condutores: Aluminum
- Revestimento: Nu
- Material do involucro: Aluminum, Espessura (mm): 3
- Supporte barras: Isolador, Placa, Ambos
- Número de espaçadores entre cada dois isoladores (se mais de uma barra por fase): 1
- Número de subdivisões nos condutores 3 e 5: 3
- Distância max entre isoladores cond. 3 e 5 (mm): 1000
- Fluido: Air, Temp. ambiente (C): +40

The bottom panel shows the type of busbar (BMT_v) and simulation options (Força Eletrodinâmica, Elevação Temperatura, Arco Interno).

© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a pagina WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

Figura B-3 – Resultados da simulação de forças eletrodinâmicas em barramentos (validado)

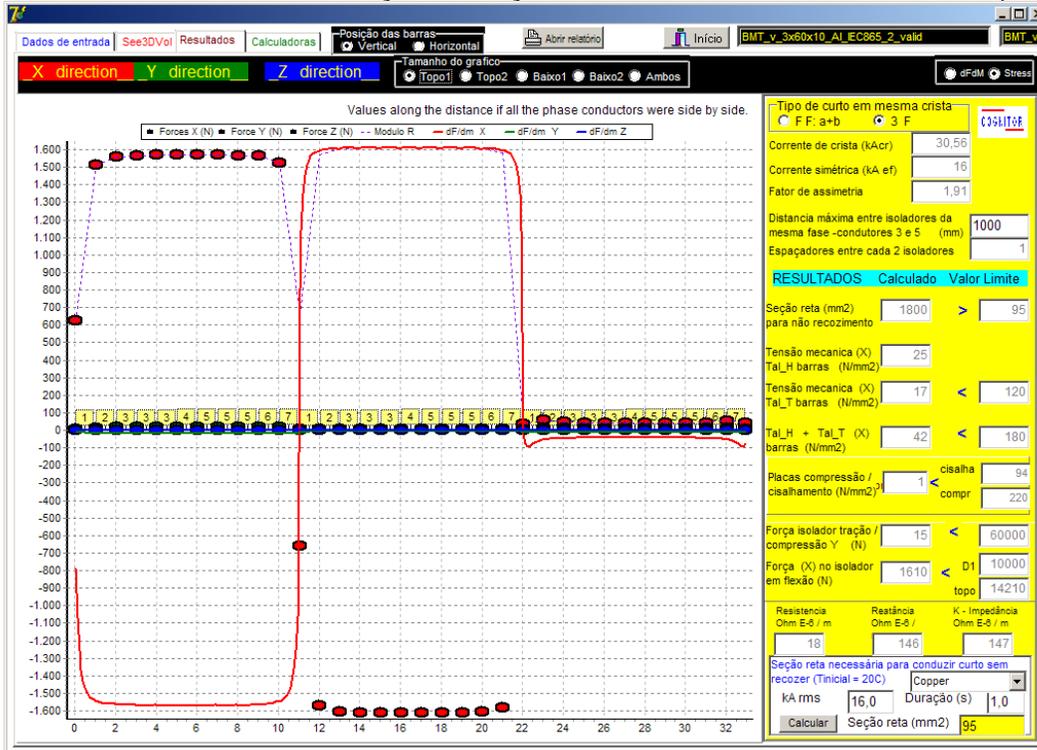
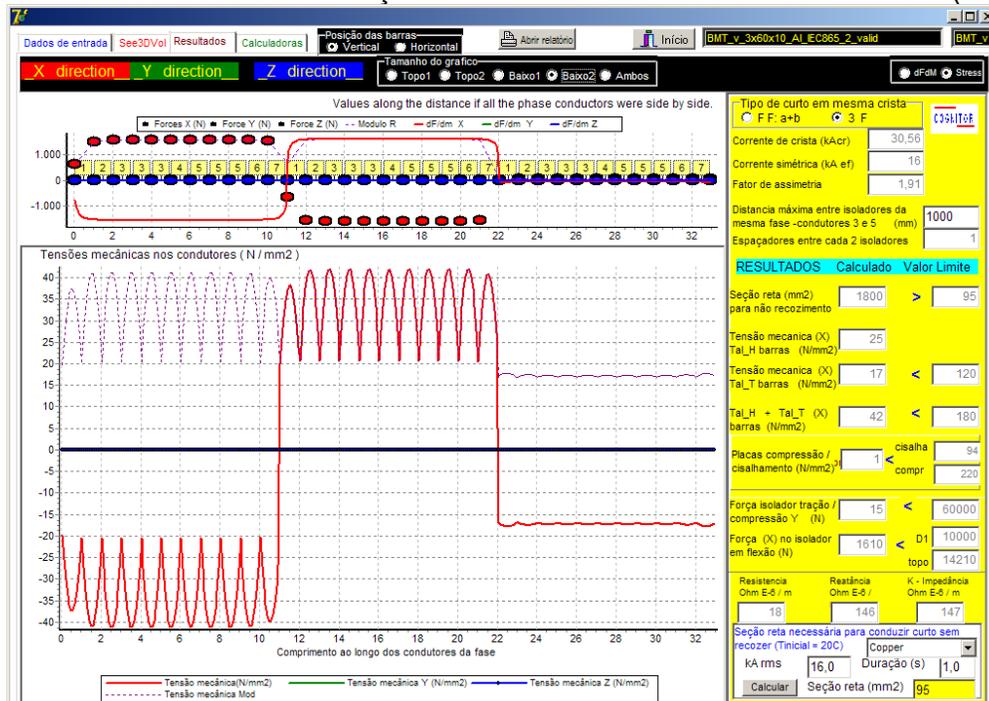
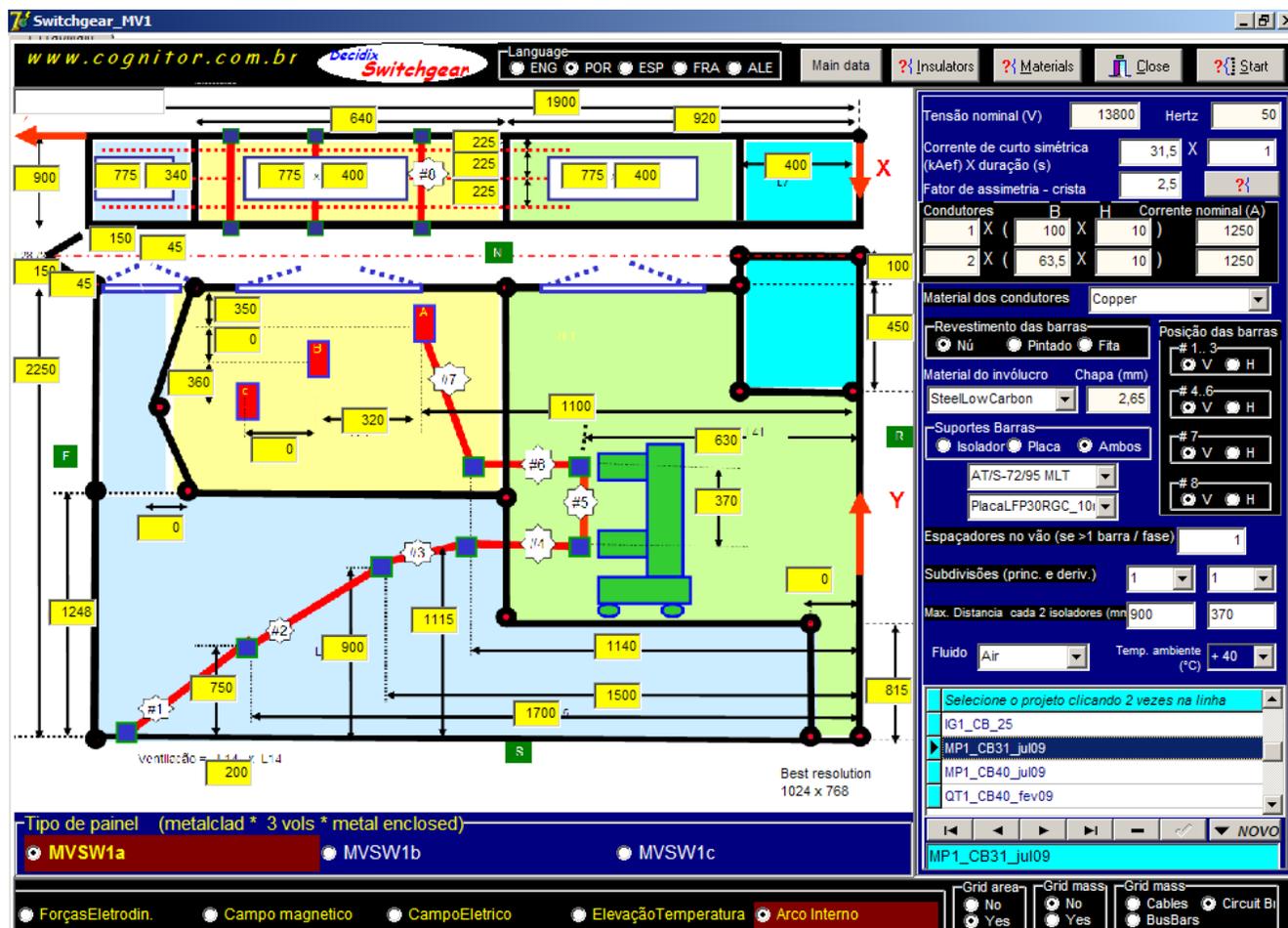


Figura B-4 – Resultados da simulação de tensões mecânicas em barramentos (validado)



© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a página WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

Figura B-5 – Dados de entrada para painel 15 kV



© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a pagina WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

Figura B-6 – Resultados da simulação de forças eletrodinâmicas em um painel 15 kV aprovado nos ensaios com 31,5 kA durante 1s – 79 kA cr

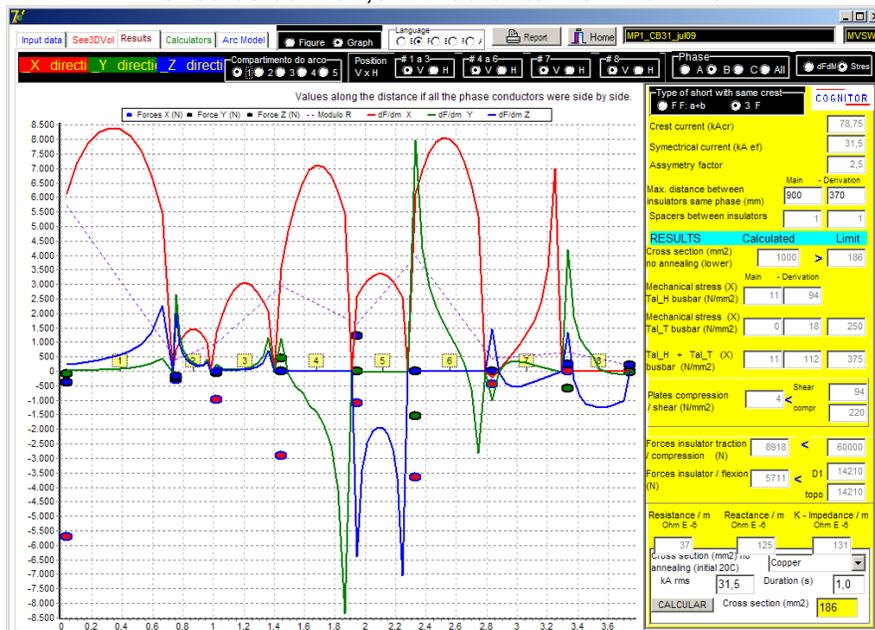
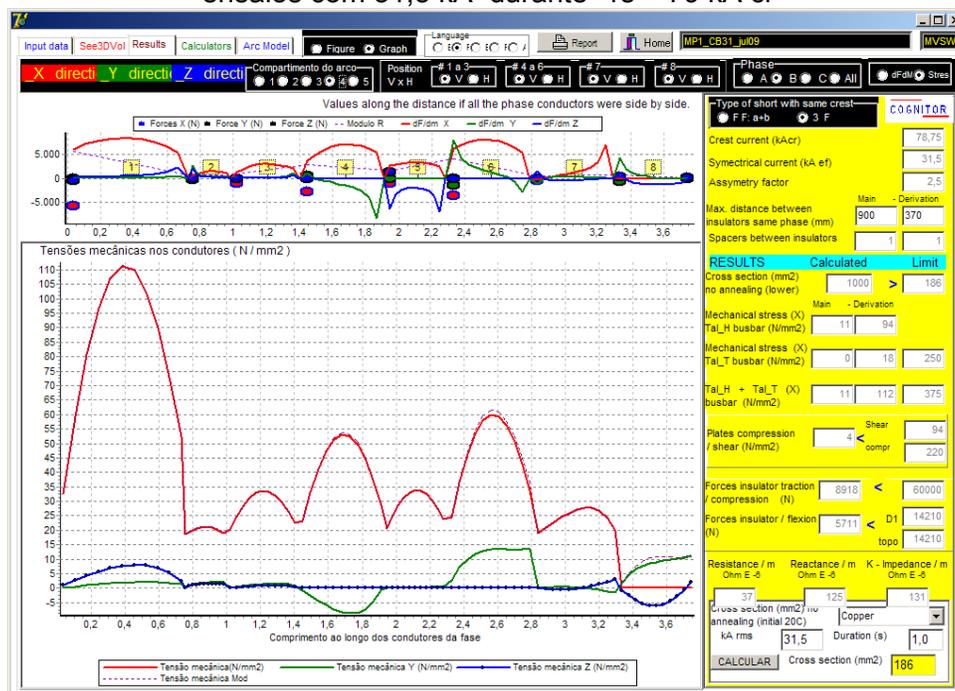


Figura B-7 – Resultados da simulação de tensões mecânicas em um painel 15 kV aprovado nos ensaios com 31,5 kA durante 1s – 79 kA cr



© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a página WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

C) ENSAIOS DE ARCO INTERNO.

A classificação de arco interno destina-se a oferecer um nível testado de proteção a pessoas nas proximidades de um painel em que ocorra um arco interno. Os ensaios são aplicáveis a equipamentos de baixas a altas tensões. Para média tensão o ensaio do tipo é definido na IEC 62271-200. Esta define uma classificação IAC (classificação de arco interno) tendo em conta os tipos de acessibilidade (frente, traseira e laterais) e os efeitos dos gases e partículas ejetadas.

A Figura C-1 é dá uma ideia dos fundamentos. Os indicadores de algodão representam a pele das pessoas próximas que não podem ser queimadas pelos gases quentes provenientes do interior.

Este teste ainda não é um ensaio de tipo para painéis de baixa tensão. Como os riscos e níveis de energia em instalações acima de 40 kA são consideráveis é uma questão de tempo para que o que está prescrito no documento “IEC TR 61641 (2008) Enclosed Low Voltage Switchgear Assemblies – Guide for Testing under conditions of arcing due to internal fault” vire uma especificação regular dos compradores..

Figura C-1– Ensaio de arco interno



A simulação do ensaio de arco interno é uma tarefa complexa, pois envolve a necessidade de desenvolver não apenas um modelo competente de arco, mas também para trabalhar com dinâmica de fluidos no nível de fluidos compressíveis. Do ponto de vista de comparar os resultados dos testes com os resultados da simulação, existem dois critérios principais para ser aprovado nos testes:

- (a) As portas não devem abrir ou dobrar permitindo gases quentes sair;
- (b) Os gases ejetados por partes de alívio de pressão não deve queimar indicadores de algodão localizados perto das partes acessíveis. Esses indicadores simulam a pele das pessoas nas imediações e podem ser queimados pela reflexão de gases nas paredes e no teto

O critério "portas não devem abrir" significa que as forças devido à pressão interna e as tensões mecânicas em placas, parafusos e outros não podem ir além de certos limites dos materiais. Para as chapas de aço, isso poderia significar que a tensão ($\sigma_{0,2}$) não deve ser superior a 1270 N/mm² para evitar uma deformação superior a 0,2%..

O critério "não queimar os indicadores de algodão" significa que as partículas ejetadas (gases quentes) não podem chegar aos mesmos e isto é difícil de simular. Há técnicas 3D que dão uma ideia de se uma certa solução tecnológica é melhor que outra (ver Figura C-5).

Para permitir um uso prático de simulações de arco interno é necessário criar indicadores de comparação que não dependam de técnicas sofisticadas, como calcular as linhas de fluxo das partículas ejetadas.

Os dados de entrada para fazer os cálculos são a tensão da fonte, a corrente de curto circuito, as resistências, indutâncias e capacitâncias do circuito externo (para o modelo de arco), o condutor metálico, os materiais de fluido e geometria do compartimento e do dispositivo de alívio de pressão. A geometria inclui a posição dos tetos, paredes e indicadores de algodão. Em meu trabalho de consultoria para fabricantes de painéis isolados a ar (15-36 kV) utilizo os seguintes parâmetros:

- (a) o valor de pico do ΔP da sobrepressão (máx. 70 até 90%)
- (b) o tempo para o pico de sobrepressão.
- (c) o tempo para 50% do valor do pico de pressão (como feito para ondas de impulso utilizadas em testes dielétricos)
- (d) a integral de curva de sobrepressão x tempo $\Delta P \times T$ (máx. 20 a 40 bar x mili-segundos)

Nas linhas a seguir apresento a seqüência para o desenvolvimento de software de simulação para o os ensaios de elevação de temperatura e também para as sobrepressões do ensaio de arco interno.

É um único código para ambos os testes, e não dois modelos diferentes. O único aspecto a considerar é que, na simulação da prova de arco interno quando a temperatura de um condutor (condutor do arco) atinge a temperatura de vaporização transforma-se o volume dessa massa de "sólido ou líquido" para "gás".

O volume inicial de um fio de cobre sólido, com 1 milímetro de diâmetro e um comprimento de 300 milímetros pode se tornar da ordem de 0.5 m³. Se você adicionar 0,5 m³ de gás em um compartimento fechado de 1 m³ inicialmente a uma pressão de 1 atm a pressão vai para 1,5 atm.

Para fazer isso é necessário usar as propriedades físicas dos materiais (calor específico, densidade, condutividade térmica e outros) como uma função da temperatura. Ao simular o ensaio de elevação de temperatura pode-se manter estas propriedades fixas, porque eles não variam muito. No entanto, quando você vai além das temperaturas de fusão e vaporização elas mudam muito.

Outro truque é que quando você está simulando um "teste de elevação de temperatura em condições de" arco você precisa criar um limite superior para a temperatura do arco. Você pode escolher esse limite como 4000 K, 8000 K, 12000 K, 20000K. No meu caso quando eu uso um valor em torno de 12.000 a 15000K a curva de sobrepressão é muito perto da uma medida no laboratório. Eu não uso o fator KP citados na literatura em qualquer parte do código

Ao invés de fixar um valor médio para a tensão do arco eu uso um modelo simplificado para o cálculo da tensão do arco (Mayr ou Cassie). A ideia é apenas fazer um "teste de elevação de temperatura" de zero às altas temperaturas do arco, mas forçá-lo a que a temperatura não passe de p.ex. 12000 K.

Quando a pressão interna calculada ultrapassa, digamos 1,5 atm, o dispositivo de alívio de pressão será aberto devido ao efeito da força = pressão x área. Tendo a força interior e algumas noções básicas de mecânica você pode estimar a área livre da abertura, em cada instante. Tendo a pressões interna e externa e a área de abertura pode-se calcular a quantidade de massa que está saindo do compartimento e a evolução da pressão interna.

No meu caso eu uso apenas a equação do balanço de energia e abordagem unidimensional por volumes finitos para calcular a temperatura ao longo de um cilindro ou uma barra retangular. Utilizando as propriedades físicas em função das temperaturas os valores de perdas por irradiação, condução, convecção os valores irão mudando. Pode-se fazer alguma correção sobre o raio do condutor (condutor de arco), em função da temperatura.

Figura C-2 – Dados de entrada para arco interno em painel 15 kV - 1250 A – 31,5 kA -1s . (ver dimensões em Fig. B-5)

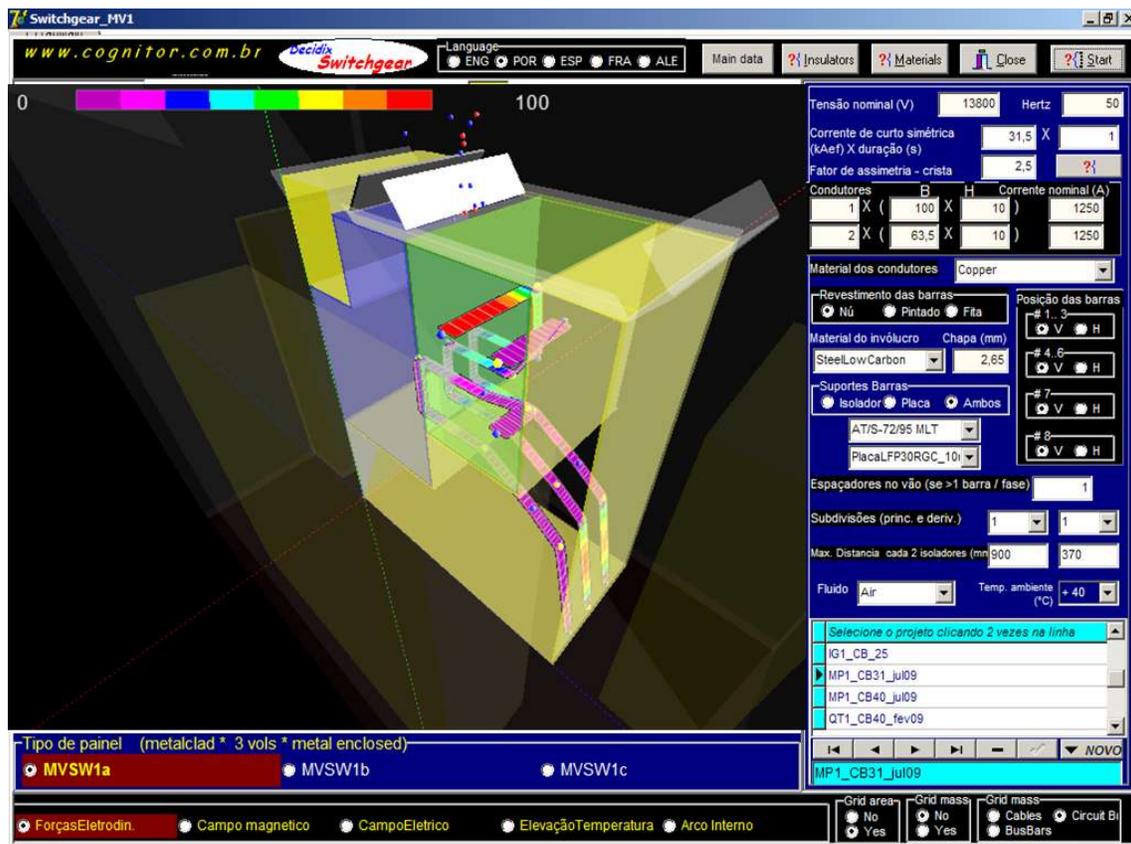


Figura C-3 – Simulação sobrepressão x duração (compartimento do disjuntor)

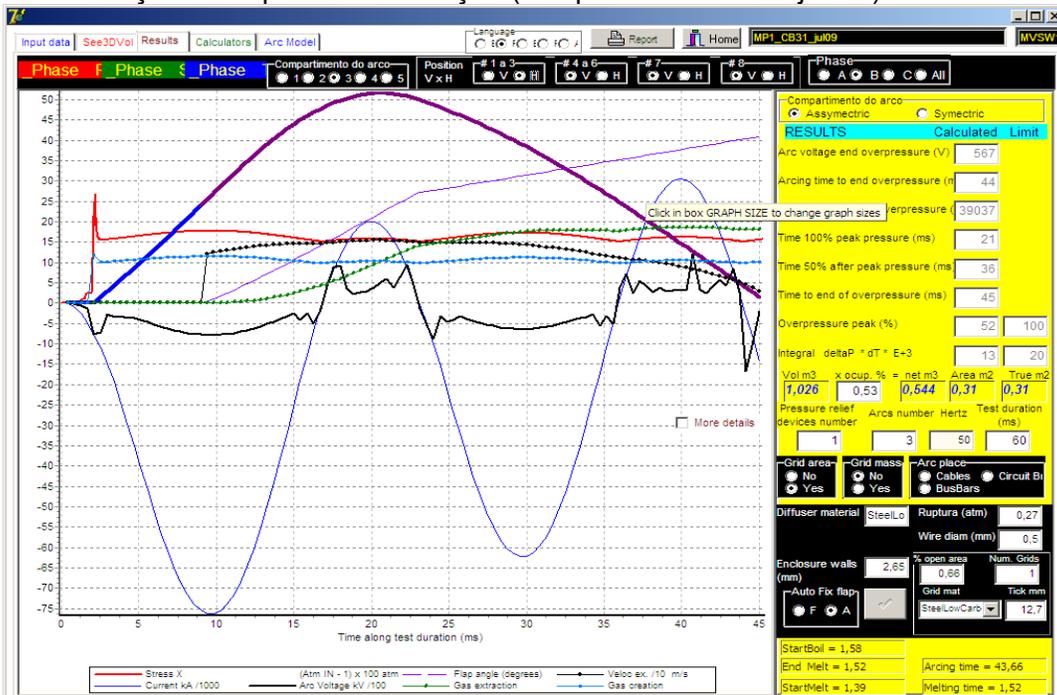


Figura C-4 – Ensaio sobrepressão x duração (compartimento do disjuntor)

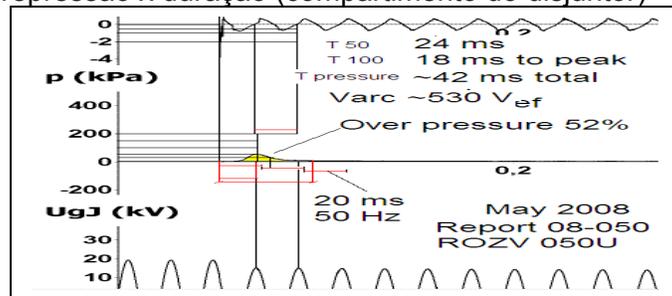
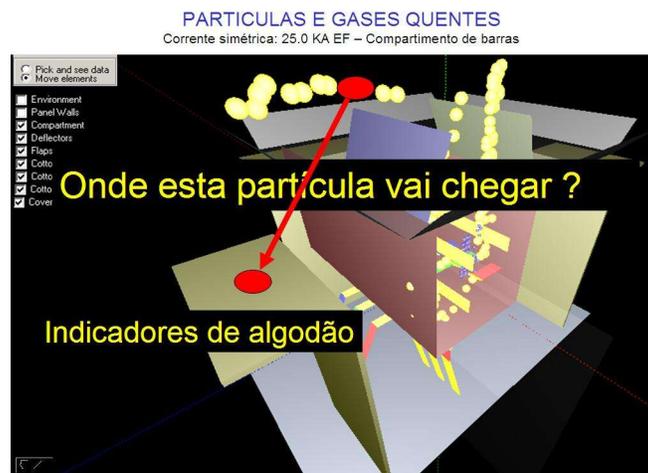


Figura C-5 – Método 3D para estimar alcance dos gases quentes



© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a pagina WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br

© Copyright. Este artigo pode ser reproduzido, como uma peça completa, copiado e utilizado em qualquer forma sem especial permissão do autor sob a condição de que seja referenciado, em todas as vezes, o nome do autor e a página WEB www.cognitor.com.br Artigo: "Validação de simulações de ensaios de arco interno, de forças e de elevação de temperatura em ... (e partes do código-fonte)". Autor: Sergio Feitoza Costa Email: sergiofeitoza@cognitor.com.br