

## Simulação da explosão de transformadores em usinas hidrelétricas via fluidodinâmica computacional

## Transformer explosion simulation in hydroelectric plants through computational fluid dynamics

### RESUMO

Transformadores são componentes sujeitos a explodirem devido a curtos-circuitos cujo colapso pode causar grande estrago principalmente em hidrelétricas, onde estes são mais potentes. Devido a esse motivo, este trabalho visa simular esse fenômeno realizando análises com paredes corta-fogo. No decorrer deste trabalho buscou-se mostrar como funcionam os transformadores e o grande perigo envolvendo o colapso destes componentes, observam-se os vários fenômenos por trás de explosões e estuda-se a fluidodinâmica computacional com ferramenta computacional para a simulação desses fenômenos. Para o estudo, idealizou-se uma situação hipotética onde há a explosão de um transformador de médio porte e realizou-se a simulação no software Ansys Autodyn, adicionando sensores de pressão em cinco lugares diferentes da barreira para descobrir a variação de pressão ao longo do tempo, foi verificado a maior intensidade incidindo na barreira e foi feita uma análise estrutural da peça, com os dados desta análise podem-se dimensionar tais estruturas para que suportem tais esforços, por consequência evitando prejuízos exorbitantes e podendo até mesmo salvar vidas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Parede Corta-Fogo. Fluidodinâmica. Transformador. Explosão.

### ABSTRACT

Transformers are components that can explode due to short circuits, causing major damage, especially in hydroelectric power plant structures, where they are most powerful. For this reason, this work aims to simulate this phenomenon by performing analysis with explosion protection barriers - blast walls. Throughout this work tried to show how the transformers act and the great danger that involves the collapse of these components, observe the various phenomena behind the explosions and study the computational fluid dynamics with a computational tool to simulate these phenomena. For the study, a hypothetical situation was devised in which a medium-sized transformer is blown up and simulated in Ansys Autodyn software, adding pressure sensors at five different locations on the barrier to find pressure variation over the same time. The highest impact intensity on the barrier and a structural analysis of the part was made, with the data of this analysis it is possible to dimension such structures to support such efforts, consequently avoiding exorbitant damage and even saving lives.

**KEYWORDS:** Blast Walls. Fluid Dynamics. Transformer. Explosion.

**Thayrone Silverio Oliveira**  
[thayroneoliveira@alunos.utfpr.edu.br](mailto:thayroneoliveira@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil.

**Dr. Jeferson Rafael Bueno**  
[jefersonrafael@utfpr.edu.br](mailto:jefersonrafael@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil.

**Tamires Maria de Souza Martins**  
[tamiresmartins3003@gmail.com](mailto:tamiresmartins3003@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil.

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Um estudo da *International Association of Engineering Insurers* (IMIA) analisou, nos diferentes países membros de sua organização, durante os anos de 1997 a 2001, casos de falhas em transformadores chegando a conclusão que houveram perdas de 94 transformadores atingindo um prejuízo de 124 milhões de dólares, relacionados aos danos causados pela explosão e pelo tempo de ociosidade que as empresas enfrentaram no seu meio produtivo. Segundo estatísticas o número de transformadores incapacitados aumenta 2% ao ano (BARTLEY, 2003).

O fenômeno da explosão de transformador é uma consequência de muitas causas possíveis, tais falhas vão desde a má isolamento do componente até mesmo por inundação na casa de máquinas. Sendo as causas diversas e ainda o grande potencial de perdas financeiras e de vidas associados surgiu a necessidade de se projetar um sistema de proteção contra explosões, mecanismo conhecido como *blast wall*.

Apesar de tal sistema estar sendo utilizado nas usinas hidrelétricas brasileiras, não se tem muitos trabalhos explorando estudos de esforços explosivos incidindo em barreiras de proteção.

Assegurar que as ações da detonação não se esvaeçam minimiza a possibilidade que um acidente não se torne uma catástrofe generalizada.

A metodologia consistiu na análise de *blast walls* de usinas hidrelétricas, idealizando uma situação hipotética de explosão de um transformador de 5 mVA, simulando-a na plataforma computacional ANSYS, licença estudantil, utilizando sua extensão Autodyn, que tem como principais características o estudo por fluidodinâmica.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a metodologia da proteção contra explosão de transformadores a pesquisa foi dividida basicamente em duas fases, sendo uma fase de idealização de um possível problema e uma fase de simulação computacional.

O estudo de hipotético consistiu em idealizar uma situação realística do ambiente de uma casa de máquinas onde está localizado o transformador de potência com isolamento em óleo mineral. Neste modelo necessita-se dos seguintes dados:

- a) Distância entre o centroide do transformador e a face interna do Blast Wall;
- b) As três dimensões da Parede Corta-Fogo;
- c) Potência do transformador;
- d) Volume de óleo nele contido.

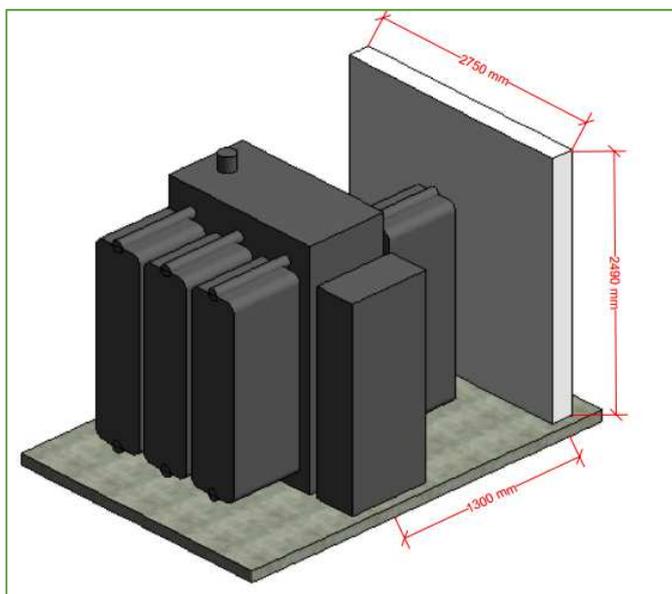
O modelo de transformador escolhido foi o de distribuição tipo subestação com a potência de 5 mVA da fabricante ABB transformadores, segundo seu catálogo o mesmo possui uma massa de 2000 quilogramas de óleo mineral (ABB,

2010). O dispositivo possui dimensões de 2,75 metros de comprimento, 1,55 metros de largura e 2,49 metros de altura conforme a Figura 1.

A distância entre o centroide do transformador e a face interna do muro foi considerada como sendo de 1,30 metros, que é o resultado do centroide da largura do dispositivo acrescido de 50 centímetros tal valor adicionado para facilitar a movimentação de funcionários, caso haja a necessidade de alguma manutenção.

A altura e comprimento do muro são equivalentes as dimensões do transformador, portanto seus dados respectivamente serão 2750 milímetros e 2490 milímetros, adotou-se também uma espessura hipotética de 20 cm, este valor adotado como espessura fictícia e pode sofrer alteração em um futuro projeto estrutural. Na figura 1 retrata a situação simulada.

Figura 1 – Esquematização da situação simulada.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Antes que haja a simulação numérica deve-se calcular a carga de TNT equivalente para o transformador adotado para a simulação. Este se dá através da equação (1) seguindo o conceito abordado por Pontes (2001). Adota-se o calor específico do TNT igual a 4,55 mJ/kg.K e o calor específico do óleo mineral isolante de aproximadamente 1,91 kJ/kg.K, é considerado a temperatura ambiente de 300 K que equivale a 26,85 graus celsius:

$$w_{tnt} = w_{oleo} \cdot \frac{c_{oleo}}{c_{tnt}} \quad (1)$$

Sendo:

$w_{tnt}$ , a carga de TNT em kg;

$w_{oleo}$ , massa do óleo mineral em kg;

$c_{oleo}$ , calor específico do óleo;

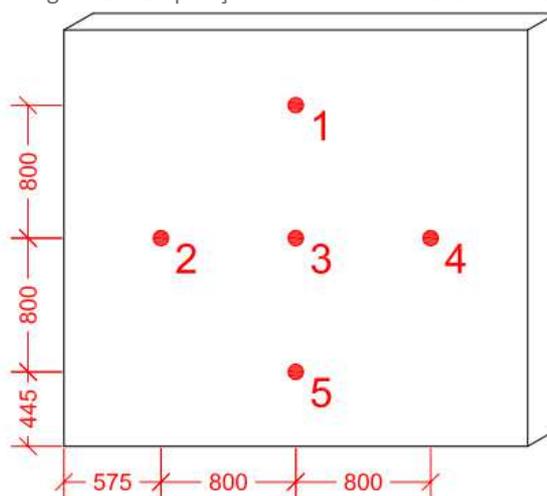
$c_{tnt}$ , calor específico da TNT.

$$w_{tnt} = 2000 \cdot \frac{1,91}{4550} = 0,84kg$$

Portanto, quando um transformador com a potência 5 mVA entra em curto e explode, seu colapso equivale ao de 840 gramas de TNT, isto considerando que toda a energia contida no transformador seja liberada.

Determinou-se também o posicionamento dos sensores de pressão, estes auxiliam na medição da pressão em relação ao tempo, foi posicionado 5 sensores com suas posições demonstradas na figura 2 e estes pré-determinados na massa de ar discretizada no processo de simulação.

Figura 2 – Disposição de sensores no *Blast Wall*.



Fonte: Autoria Própria (2019).

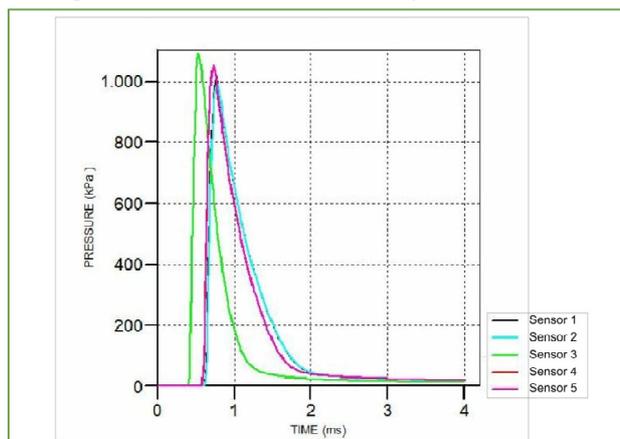
Nas simulações de explosões, utilizando o Autodyn, foi escolhida a malha Eulliriana 3D para materiais distintos com o tamanho do elemento discretizado de 10 cm, valor sugerido e adotado em algumas bibliografias como Luccioni e Ambrosini (2005). Para as condições iniciais, a temperatura foi considerada de 300 kelvin e a pressão inicial de 1 atm. Os conceitos de Fluidodinâmica, simulações pelo Ansys Autodyn e Explosões foram tomados como base os estudos de Neto (2015) e Bueno (2018).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisando a figura 3 e tabela 1 podem-se observar, respectivamente, os gráficos de sobrepressão variando com o tempo de cada sensor e os máximos de sobrepressões incidindo sob os mesmos assim como o tempo de incidência correspondente.

Página | 5

Figura 3 – Gráficos Pressão x Tempo dos sensores.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Tabela 1 – Resultados medidos pelos sensores.

Sensor	Tempo de Chegada (ms)	Sobrepessão (kPa)
1	0,77309	1013,60
2	0,78252	992,83
3	0,53063	1088,60
4	0,73594	1048,70
5	0,73590	1047,10

Fonte: Autoria Própria (2019).

Após determinar os efeitos de onda de choque em diversos pontos deve-se estudar também o comportamento da estrutura quando solicitada a esta sobrepessão. Para realizar este estudo foi simulado no FTOOL para ser estudado a análise estrutural simulando a mesma admitindo que fosse um elemento de barra. A simulação consistiu em modelar um elemento unidimensional que representa a parede, nesta aplicou-se um esforço de superfície no valor da maior sobrepessão registrado pelos sensores, no caso a pressão de 1088,60 kPa medido pelo terceiro sensor. Se obtiveram como esforço cortante máximo o valor de 2710,60 kN e o valor máximo de momento fletor de 3374,70 kN.m. Ambos os máximos resultados foram encontrado na base da peça devido ao engaste.

## CONCLUSÃO

Explosões de transformadores não são tão comuns, porém seu potencial destrutivo é bastante alarmante, por este motivo se deve considerar esse efeito em estruturas de hidrelétricas. Ao se analisar a proposta e os resultados pôde-se verificar a magnitude dos esforços envolvidos atuando em uma pequena estrutura, tais esforços derivados de um transformador de médio porte destinado a subestações.

Como esperado, as maiores intensidades de cortante e momento estão localizados na base da peça, ou seja, no seu engaste, a partir destes valores tanto pode se fazer a verificação de uma estrutura já existente que apresente as mesmas características quanto também o dimensionamento da peça escolhendo

determinados materiais. Deve-se atentar com a probabilidade de tal fenômeno acontecer adotando os coeficientes de cálculo mais apropriados para esta situação. Além de observar que o fenômeno foi tratado como problema estático, porém vale a pena realizar uma análise dinâmica da peça, pois se sabe que o esforço atuante sob a peça se trata de uma carga impulsiva.

Este trabalho visou à análise estrutural da mesma, porém o próximo passo para o dimensionamento da peça se dá através dos esforços atuantes, após adotar os coeficientes de cálculos cabíveis o elemento poderá ser calculado de maneira similar a uma viga engastada, devido às semelhanças em seus esforços solicitantes, necessitando de mais atenção na ancoragem da peça.

### REFERÊNCIAS

ABB TRANSFORMADORES (Santa Catarina). **Transformadores de distribuição Monofásicos, trifásicos, tipo subestação, tipo subterrâneo e tipo pedestal**. Blumenau: Abb Transformadores, 2010. Color.

BARTLEY, William H.. Analysis of Transformer Failures. **International Association Of Engineering Insurers**, Stockholm, v. 36, n. 1, p.1-12, jun. 2003. Anual. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/512f/4e9992c567e45ee96258dd54b3a6b6a3447a.pdf> Acesso em: 12 Ago. 2019.

BUENO, Jeferson Rafael. **Distribuição de pressões e impulsos devidos explosões não confinadas em edifícios e elementos de proteção à explosão**. 2018. 328 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/192791> Acesso em: 12 Ago. 2019.

COSTA NETO, Murilo Limeira da. **Um estudo do fenômeno explosão e das ondas de choque utilizando a fluidodinâmica computacional**. 2015. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <http://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M15-4A-Murilo-Neto.pdf> Acesso em: 12 Ago. 2019.

LUCCIONI, Bibiana; AMBROSINI, Daniel. BLAST LOAD ASSESSMENT USING HYDROCODES. **Congreso Argentino de Mecánica Computacional**, Buenos Aires, v. 8, n. 1, p.329-344, nov. 2005. Anual. Disponível em: <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/download/34/34> Acesso em: 12 Ago. 2019.

PONTES, Rosemeri Oliveira. **Modelo matemático para explosões em transformadores**. 2001. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2001. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5718> Acesso em: 12 Ago. 2019.