



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO -XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS  
E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM**

**REATORES DE DERIVAÇÃO – VIBRAÇÃO EM TANQUES RELACIONADAS COM NÍVEL DE RUÍDO E  
SOLICITAÇÕES MECÂNICAS**

**Jorge Inhasz\*  
ABB**

**Luiz Eisi Yamazaki  
ABB**

**Dr José Carlos Mendes  
ABB**

**RESUMO**

A relação entre nível de ruído e as vibrações em tanques de reatores é discutível. Um reator normalmente com baixa vibração também possui um baixo nível sonoro, porém o nível de ruído pode variar intensamente com a mesma vibração considerada. Medições realizadas em diversos reatores e transformadores têm mostrado que a eficiência de radiação, que é função da potência sonora e da velocidade, depende fortemente da frequência e do projeto do tanque propriamente dito. As baixas amplitudes de vibração são consideradas de fundamental importância, pois causam tensões dinâmicas nos painéis dos tanques de reatores.

**PALAVRAS-CHAVE**

Reatores, Derivação, Ruído, Vibração, Frequência

**1. INTRODUÇÃO**

Um núcleo de reator do tipo de derivação, normalmente é constituído de uma coluna central, onde discos construídos a partir de tiras de chapas de material magnético justapostas radialmente são colocadas de forma axial, sendo separadas por um elemento não magnético (blocos de esteatite – espaçadores), formando um espaço entre os discos, conforme mostrado na figura 1. A energia magnética é gerada nos espaçadores.

As forças magnéticas entre os discos são consideráveis da ordem de 500.000 N (50 ton). Estas forças são produzidas com o dobro da frequência de geração e estão presentes ao longo de toda vida operacional do reator [1]. Toda a estabilidade mecânica é estritamente dependente destas forças geradas.

Vibrações excessivas podem gerar problemas de desempenho assim como a fadiga dos materiais das partes mecânicas associadas, da estrutura do tank e também dos acessórios. De um modo geral, o nível sonoro emitido pelo reator pode causar uma perturbação de caráter ambiental. Em particular há uma tendência dos limites sonoros especificados serem cada vez mais rigorosos, beneficiando o cliente final de modo a se obter um comissionamento tranquilo, e continuando assim ao longo de sua vida útil.

Paralelamente ao conceito do projeto do reator, experiências têm mostrado que a precisão e consistência durante a fabricação tem um impacto significativo no desempenho do equipamento. Baixos níveis de ruído e vibrações, que perduram ao longo da vida útil do equipamento, são indicativos de qualidade na fabricação e uma boa concepção de projeto do reator

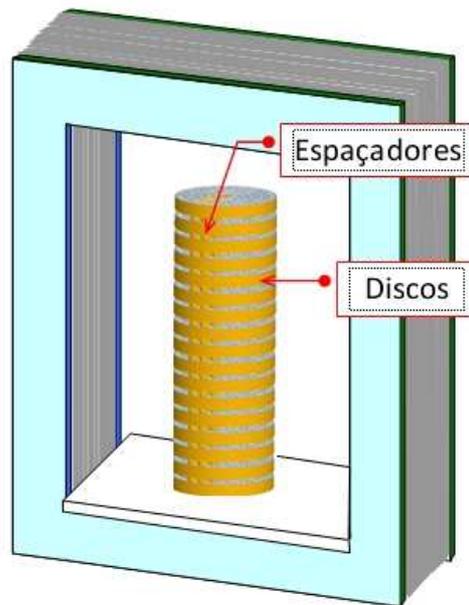


Figura 1 – Esquema de um reator monofásico e a coluna central formada pelos discos com seus espaçadores

Desta forma, este pequeno estudo, apresenta a relação entre nível de ruído e vibração e seus efeitos na confiabilidade do reator. Uma avaliação crítica nos limites máximos de vibração estabelecidos pelas normas IEC e ANSI serão também objeto de pesquisa.

## 2. CONCEITOS TÉCNICOS INICIAIS

### 2.1 Comparativo entre as normas IEC e IEEE

De acordo com a norma IEEE o reator de derivação deve ser ensaiado sob condições normais de operação. De um modo geral as partes ou componentes do reator devem ser medidos através de um transdutor. Uma das opções descritas na norma é medir a aceleração na superfície do componente com um acelerômetro, e então calcular o valor de amplitude pico a pico. Medições de aceleração, ao invés de velocidades ou deslocamentos, são preferenciais para altas frequências. A precisão do instrumento de medição deve ser de no mínimo  $\pm 10\%$  na segunda harmônica da frequência de excitação.

Há instrumentos de grande versatilidade que podem fornecer valores de aceleração, velocidade, deslocamento pico a pico e frequência, automaticamente, bastando selecionar no próprio aparelho, além de ser um analisador de vibração propriamente dito.

Não é pático definir um ensaio de vibração para qualificar os elementos da parte interna, como o núcleo e enrolamentos, mas a vibração do tank, originária das vibrações provenientes das partes internas, é perfeitamente mais adequado, embora, exista instrumentos de monitoramento, conectados a um acelerômetro fixo à ferragem do núcleo e interligado através de um cabo blindado capacitivo ao instrumento analisador que se situa do lado de fora do reator. Ver Figura 2.



Figura 2 – Conexão do cabo do acelerômetro com a parte externa (Central de Manobra)

Para se efetuar as medições do lado externo do tanque, cada lateral do tanque do reator, é dividido em 12 áreas retangulares, e assim em cada área, com o sensor do instrumento em contato com a chapa do tanque do reator,

executa-se uma varredura na área a fim de verificar o máximo valor encontrado. O nível de vibração é dado pelo valor de amplitude pico a pico. A norma determina que o valor da amplitude média de todos os pontos não deve exceder 60  $\mu\text{m}$  e também não deverá exceder um valor máximo em cada região de 200  $\mu\text{m}$  [2].

Os critérios de medição de vibração da norma IEC são similares aos da norma IEEE, porém menos detalhada. De acordo com a norma IEC 289, a forma com que é realizado o ensaio deve ser decidido antes de se iniciar as medições de vibração. Deve-se verificar em quais condições é acordado ou especificado o ensaio, se de rotina ou de tipo, e se a tensão do reator para teste será a nominal ou a máxima de operação, e também, como e onde as medições devem ser tomadas. As medições devem ser determinadas pico a pico da amplitude de vibração e o valor máximo recomendado em qualquer lugar medido deve ser de 200  $\mu\text{m}$ .

## 2.2 Eficiência de Radiação $\sigma$

A eficiência de radiação ( $\sigma$ ) nos mostra a relação existente entre a vibração estrutural da superfície e a potência sonora (P), conforme a expressão (1):

$$\sigma = \frac{P}{\rho \times c \times A \times \tilde{v}^2} \quad [^-] \quad (1)$$

$\rho$  = densidade do material [kg / m<sup>3</sup>]

$c$  = velocidade acústica [m/s]

$A$  = área da superfície [m<sup>2</sup>]

$\tilde{v}$  = RMS – velocidade média [m<sup>2</sup>]

A eficiência de radiação é um fator que varia de 0 a 1, onde o valor máximo corresponde a máxima potência sonora. Como se observa na expressão (1), a velocidade de vibração da superfície estudada influencia fortemente a potência sonora gerada. O nível de potência sonora é definido de acordo com a potência de referência ( $P_0 = 10^{-12}$  W), conforme mostrado na expressão (2):

$$L = 10 \log \left( \frac{P}{P_0} \right) \text{ [dB]} \quad (2)$$

A expressão (1) pode ser transformada em potência sonora, com o auxílio da expressão (2):

$$L = 10 \times \log(\sigma \times \rho \times c \times A \times \tilde{v}^2) - 10 \times \log(P_0) = 10 \times \log(\sigma) + 10 \times \log(\rho \times c \times A \times \tilde{v}^2) - 10 \times \log(P_0) \quad L \text{ [dB]} \quad (3)$$

Na expressão (3) podemos observar que com o aumento de  $\sigma$  o nível da potência sonora também se eleva. O parâmetro depende de vários fatores, porém os mais importantes são o material da superfície, a estrutura da mesma e a frequência sonora.

O nível de velocidade média ( $L_v$ ) para a mesma superfície considerada também é definido conforme a velocidade de referência ( $\tilde{v}^2 = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ), como mostrado na expressão:

$$L = 20 \log \left( \frac{\tilde{v}}{\tilde{v}_0} \right) \text{ [dB]} \quad (4)$$

A contribuição da eficiência de radiação ( $\sigma$ ) para a potência sonora pode ser calculada como sendo a diferença entre níveis de intensidade sonora ( $L_1$ ) e ( $L_v$ ), conforme a expressão (5) [4] [5].

$$L_\sigma = 10 \times \log(\sigma) = L_1 - L_v \text{ [dB]} \quad (5)$$

## 3. RELAÇÕES ENTRE VIBRAÇÕES NO TANQUE E O NÍVEL DE RUÍDO

### 3.1 Geral

Há uma correlação entre as vibrações no tanque e os níveis de ruído que é gerado no reator. A potência sonora é proporcional ao quadrado da velocidade média de vibração RMS da superfície considerada.

As forças cíclicas geradas nos espaçadores da coluna do núcleo do reator são a principal fonte sonora. Elas fazem com que haja vibração na coluna e nas ferragens gerando ruído. O ruído é transmitido para o tanque do reator. Grande parte da potência sonora gerada no tanque do reator é radiada e depende da eficiência de radiação na superfície do tanque a qual é determinada pela expressão (1).

### 3.2 Eficiência de Radiação no Tanque do Reator

Eficiência de radiação de três diferentes reatores shunt foram medidos e alguns dos resultados são apresentados no gráfico da figura 3. A eficiência de radiação não pode ser medida diretamente, devendo ser derivada das medidas das velocidades médias de vibração na superfície do tanque do reator e da potência sonora. A área do tanque foi dividida em sub áreas. A velocidade média de vibração para cada sub área e o nível de potência sonora externa a cada sub área foram medidas. As contribuições da eficiência sonora foram calculadas de acordo com a expressão (5).

A eficiência de radiação para um tanque normal não é somente dependente da superfície considerada do tanque do reator e de sua geometria, mas também da frequência sonora. A contribuição da eficiência  $\sigma$  foi medida e calculado em cada oitava de frequência média: 125, 250, 500 e 1000 Hz. Os resultados são apresentados no gráfico da figura 3. Para ilustrar a relação entre a eficiência de radiação e a frequência, os três pontos determinados pelos valores medidos foram conectados por uma linha.

Para 125 Hz de frequência o valor médio de  $\sigma$  das três medições é 0,08, o que significa que aproximadamente 8% da potência de vibração do reator é irradiado para o ambiente através de efeito sonoro.

A eficiência de radiação sonora do tanque do reator depende do acoplamento das ondas sonoras através do ar e das ondas de vibração. A máxima transferência de energia da vibração para o som ocorre quando a superfície do tanque vibra com um comprimento de onda igual ao comprimento das ondas acústicas no ar. Para o painel do tanque a frequência coincidente é de aproximadamente 2000 Hz. A eficiência de radiação aproxima-se de 1 para esta frequência ( $\sigma \Rightarrow 1$  quando  $f \Rightarrow \infty$ ). Abaixo desta frequência, a energia transferida da vibração para o som não é tão eficiente quanto para a frequência acima daquele valor. Para um painel infinito a irradiação do som, teoricamente, seria de valor zero abaixo da frequência coincidente. [5].

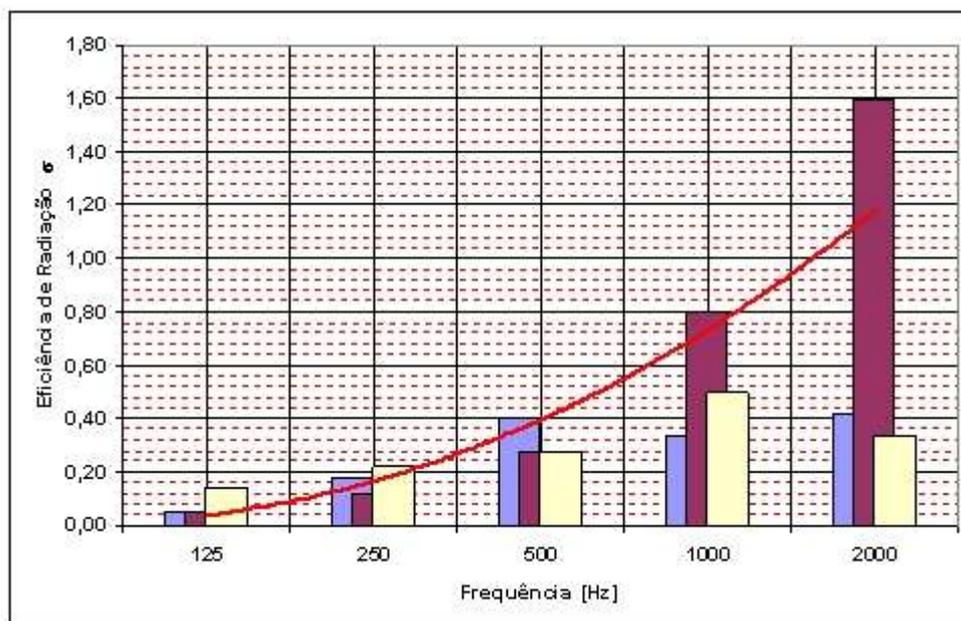


Figura 3 - Gráfico da Eficiência de Radiação x frequência – Três reatores shunt analisados

### 3.3 Eficiência de Radiação no Tanque do Reator

Medições de vibração em tanques foram efetuadas, conforme a norma IEEE descritas no item 2.1, em diversos reatores shunt. Os resultados foram comparados com os níveis de pressão sonora dos reatores correspondentes. A relação entre as vibrações medidas e os níveis de pressão são mostrados no gráfico da figura 4.

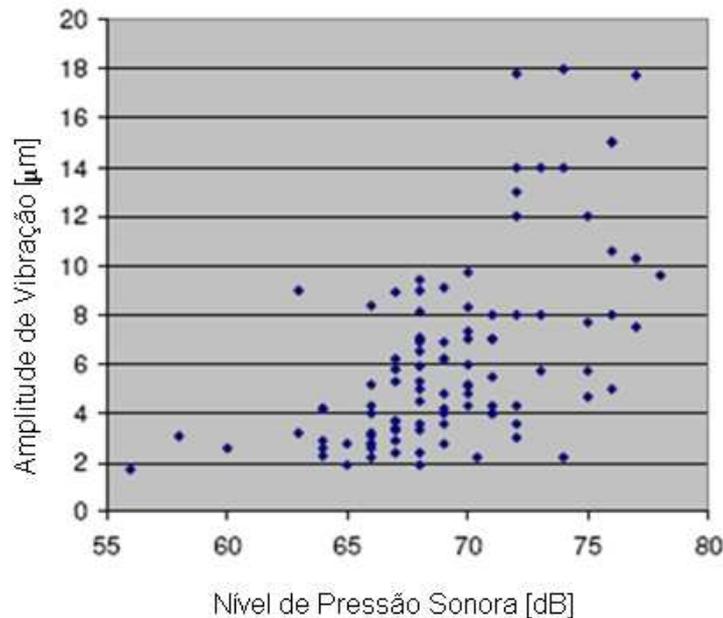


Figura 4 – Medições de vibração de amplitude pico a pico efetuadas no tanque em função dos níveis de pressão sonora correspondentes

Como se pode observar na estatística demonstrada no gráfico da figura 4, as vibrações e os níveis de pressão sonora são correlatas, porém há um grande desvio padrão entre os valores. Quando se observa o valor único do nível de pressão sonora, fica claro de que os reatores shunt de mesmo valores de níveis de pressão sonora possuem diferentes valores de amplitude de vibração. Outra observação proveniente das medições de vibração da parte ativa efetuada em diversos reatores é de que as vibrações máximas do tanque são sempre maiores do que no núcleo dos reatores, sendo as vezes de grande magnitude. Isto é evidente de que não somente o tanque transmite as vibrações provenientes do núcleo como também em muitos casos as amplifica nos painéis do ocorrendo ressonância.

#### 4. QUESTÕES PRÁTICAS SOBRE AS VIBRAÇÕES EM REATORES DE DERIVAÇÃO

##### 4.1 Tensões Mecânicas e Vibrações nas Chapas

Vibrações nos tanques de reatores com altas amplitudes podem causar um funcionamento imperfeito em equipamentos sensíveis, caso não sejam montados adequadamente, ou mesmo, não proceder no isolamento da vibração do tanque do reator para o instrumento. As vibrações em si, não são prejudiciais para o tanque do reator, porém, as tensões mecânicas causadas por elas podem ocasionar preocupações a longo prazo. As tensões dependem das amplitudes de vibrações, mas também de outros fatores, como o tamanho da placa onde ocorrem as vibrações, a espessura e as condições ao redor da placa.

As tensões dinâmicas nos painéis de tanque de reatores, causadas por vibrações, podem ser determinadas através de medições executadas por instrumentos os quais são conectados a sensores denominados) extensômetros, montados adequadamente nos locais onde se queira medir essas tensões. Desta forma, tendo em vista o local onde se queira medir e o módulo de elasticidade do material, é possível calcular as tensões, porém uma das dificuldades é posicionar o extensômetro no local de máxima tensão de vibração, o que deve ser previamente investigado com o uso de conhecimento de cálculo. Fixar o extensômetro em todos os pontos onde é considerado de máxima tensão não se torna executável devido ao grande número deles necessário para serem fixados e posteriormente removidos, uma vez que o local exato para a tensão máxima não é facilmente determinado, necessitando uma investigação prévia mais precisa. Este ponto, frequentemente se localiza nos contornos das placas, entre as junções de uma placa a outra, e, como o extensômetro necessita de um espaço livre para que seja adequadamente fixado, sem que se solte ou deslize sobre a superfície da chapa, torna-se bastante dificultoso o trabalho.



Figura 5 – Exemplo de um extensômetro para a medição em três direções

#### 4.2 Conversão da Amplitude de Vibração em Tensões nas Bordas das Placas

O método mais confiável para determinar as tensões de vibração é calcular as tensões de vibração baseado nas amplitudes de vibrações medidas. Para uma estrutura simples como a mostrada na figura 6, assumimos uma placa de comprimento infinito, simulando a altura do tanque, e, o contorno da placa engastado contra os reforços verticais do tanque.

Podemos calcular a deformação em uma placa, com seus lados todos engastados, para uma carga distribuída  $p$ , e da mesma forma, calcular também a tensão  $R_{\max}$  [7]. É possível relacionarmos os dois parâmetros, onde obtemos o resultado mostrado na figura 7.

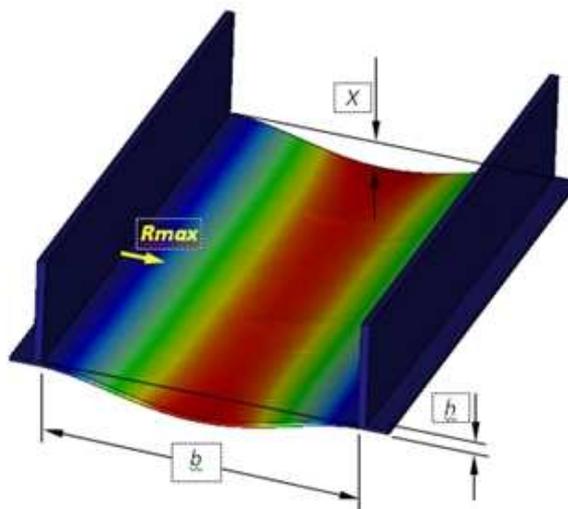


Figura 6 – Esquema de uma parte da lateral de um tanque. Uma placa de comprimento infinito, de largura  $b$  e espessura  $h$ , com ambos os lados soldados a reforços verticais. Deformação  $x$  para uma tensão máxima  $R_{\max}$ .

É admissível que a tensão máxima ocorra na chapa entre os reforços verticais ou horizontais do tanque. Descontinuidades tais como cordão de solda, flanges de conexões, etc, podem causar altas tensões localizadas, porém as máximas amplitudes de vibrações podem não ocorrer nestes locais. As formas geométricas construtivas quadráticas da combinação dos reforços pode elevar as tensões em 25%, do que àquelas de forma geométrica mais alongada, para uma mesma amplitude de vibração.

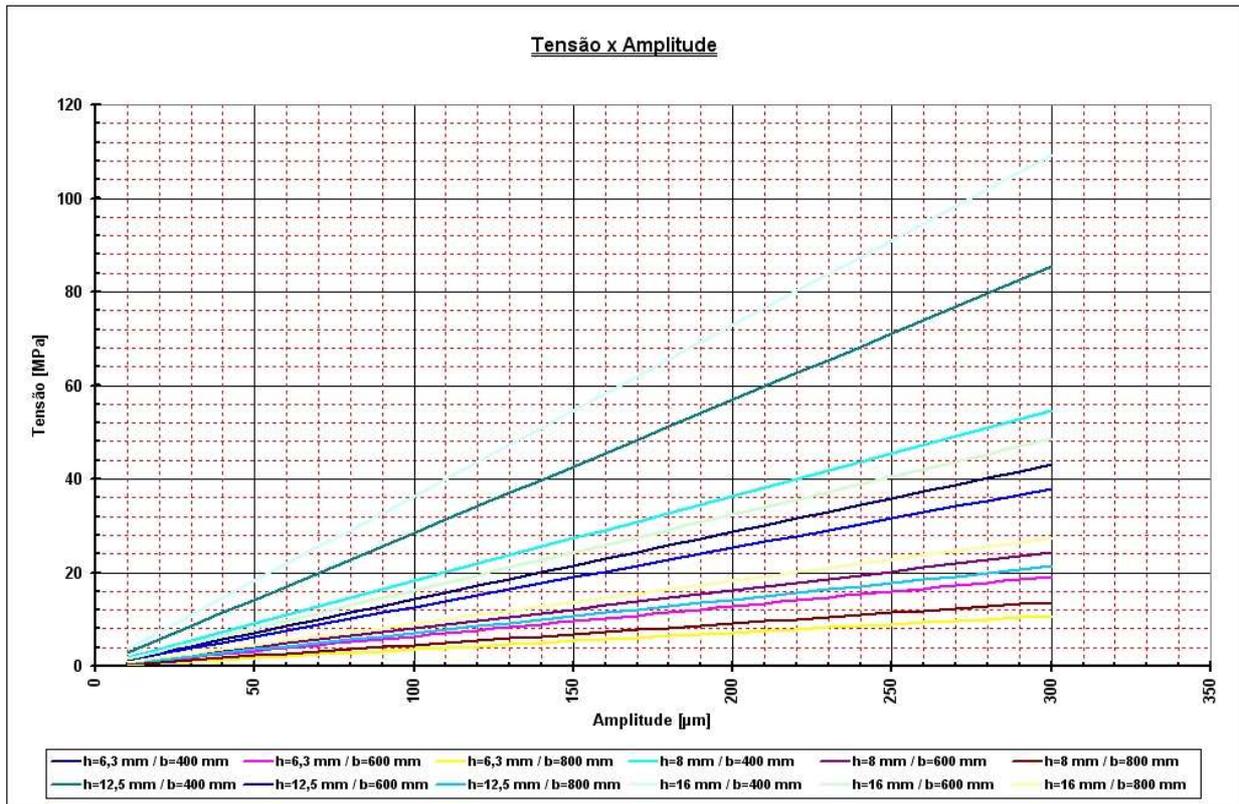


Figura 7 – Variação da tensão com relação a amplitude.

Para uma amplitude de vibração dada, a tensão pode ser muito diferente de caso para caso, dependendo da geometria. Um método comum para reduzir as vibrações é dividir os campos das chapas em áreas pequenas, reduzindo o valor de  $b$ . Na maioria dos casos há uma considerável redução de  $x$  mas a tensão de vibração  $R_{max}$  pode eventualmente aumentar. Além disso, o nível de ruído pode subir por causa da mudança inesperada da eficiência de radiação. Uma maneira mais efetiva de reduzir vibrações e tensões é evitar a ressonância entre 100 a 120 Hz em toda a chapa do tanque.

#### 4.3 Limite das Tensões quanto a Fadiga do material

Um reator em operação contínua funcionará a mais de  $3 \times 10^9$  ciclos de 100 a 120 Hz de vibração por ano. Isto impõe um limite de tensão dinâmica admissível sem que haja risco a fadiga do material. O material aço estrutural normalmente utilizado em tanques de transformadores e reatores possui um limite de tensão o qual pode ser aplicado para um número infinito de ciclos sem causar dano ao equipamento. Considerando que os contornos das chapas para cada painel do tanque são engastados através de uma soldagem do reforço à chapa do painel, uma faixa de tensão dinâmica de  $30 \text{ N/mm}^2 = 30 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  é admissível [6]. Este valor é perfeitamente suficiente seguro contra falha por fadiga do material independente do tempo de operação. Existem várias normas internacionais para construções em aço, tais como pontes, equipamentos ferroviários, automotivos, etc, onde os limites de tensão dinâmica para um número grande de ciclos de operação em estruturas soldadas são similares, independente da qualidade do aço.

## 5. CONCLUSÕES

Foi discutido omitir as medições de vibração dos procedimentos de medição normal para reatores de derivação, porém para as medições de vibrações do tanque é justificada pelo fato de não haver uma relação simples entre as vibrações do tanque e o nível de potência sonora ou nível de pressão sonora. Ressonâncias localizadas pode causar grandes amplitudes de vibrações locais, influenciando muito pouco no nível de ruído.

É considerável estabelecer os limites de amplitudes de vibração para os tanques de reatores, independente do tamanho. De certa forma é mais importante a tensão limite de vibração para um nível que seja seguro em termos de fadiga de material durante um longo período de operação.

As medições das tensões no tanque, através de extensômetros não é uma forma prática, uma vez que não se pode precisar o local exato da máxima tensão. O método que melhor convém é o de calcular as tensões através da medições das amplitudes de vibração, e assim, compará-las ao limite recomendado que é de  $30 \text{ N/mm}^2$ .

O limite estabelecido pela norma IEEE C57.12.21 e IEC 289 para um valor de amplitude pico a pico de 200µm está muito além, tendo em vista que sob condições normais de operação, valores inferiores podem causar tensões dinâmicas maiores do que aquelas recomendadas, para uma confiabilidade a longo tempo.

É recomendado que as vibrações sejam mantidas em níveis baixos independente de qual norma seja estabelecida como regra. O mais importante é que seja considerado, em termos de projeto de tanque, os níveis de ressonância na faixa de 100 ou 120 Hz.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Grundmark B.: "Large Reactors", Asea Journal 4, Volume 57, 1984
- [2] IEEE Std C57.21-1990(R2004), Standard Requirements Terminology, and Tests Code for Shunt Reactors Rated over 500 kVA", ISBN 1-55937-100-5
- [3] CEI/IEC 289, "INTERNATIONAL STANDARD REACTORS"
- [4] Harris C.: "Acoustical measurements and noise control", McGraw-Hill Inc., ISBN 0-07-026868-1, 1999
- [5] Cremer L. and Heckl M.: "Structure-Borne Sound", Springer Verlag, ISBN 0-0-387-06002-2, 1973
- [6] Regulations for steel construction, BSK, Statens Planverk, Stockholm, 1987
- [7] Raymond J. Roark and Warren C, Young: Formulas for Stress and Strain, McGraw-Hill, Inc., ISBN 0-07-053031-9, 1975.
- [8] Cigrè : "Reactor Tank Vibrations in Relation to sound Level and Mechanical Stress", Jan Anger, Claes Bengtsson, Julia Forslin – ABB Power Technologies AB Sweden; Parameswaran Iyer – ABB Ltd. India; Edie de Paula – ABB Ltda. Brazil.

## 7. DADOS BIOGRÁFICOS

Jorge Inhasz

Nascido em São Paulo (SP) em 23 de dezembro de 1959.

Graduado em 1987 em Engenharia Mecânica

Empresa: ABB – Produtos de Potência

Atua na Área de Pesquisa e Desenvolvimento