

DESENVOLVIMENTO DE MODELO NUMÉRICO PARA ADEQUAÇÃO ACÚSTICA NO PISO DAS TURBINAS DE UMA USINA HIDRELÉTRICA

Alysson Kleber Ferreira de Lima, akflima@hotmail.com¹
Helder Fábio Santos Cardoso, helderfabio2003@yahoo.com.br¹
Gustavo da Silva Vieira de Melo, gmelo@ufpa.br¹
Newton Sure Soeiro, nsoeiro@ufpa.br¹
Ivan Vieira de Melo, ivan.melo@ufpe.br²
José Jéferson Rêgo Silva, jjrs@ufpe.br²
Samir Nagi Yousri Gerges, gerges@mbox1.ufsc.br³

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, nº 1, Guamá, Belém-PA, CEP: 66075-110

²Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, nº 1235, Cidade Universitária, Recife-PE

³Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, Trindade, Florianópolis-SC

Resumo: *O processo produtivo nas usinas hidrelétricas, em geral, se dá em ambientes com elevados níveis de pressão sonora. Níveis acima de 85 dBA, por exemplo, são facilmente observados nestes espaços. Infelizmente, constata-se na maioria dos casos que uma parte significativa dos colaboradores envolvidos já desenvolveu algum tipo de perda auditiva, devido à exposição ao ruído ocupacional. Diante deste quadro, observou-se a necessidade de se desenvolver uma metodologia para o controle de ruído em ambientes diversos de usinas hidrelétricas, com base na construção de um modelo computacional, equivalente ao ambiente real, sob o aspecto acústico. Utilizando um programa computacional comercialmente disponível determinaram-se, através do método híbrido de raios acústicos e fontes imagem, os níveis de pressão sonora em diversos pontos do ambiente investigado, na forma de um mapa acústico. O modelo numérico desenvolvido foi validado, a partir de comparações com o mapa acústico experimental do espaço pesquisado, permitindo a realização de testes de soluções virtuais de controle de ruído, as quais poderão vir a ser empregadas na prática.*

Palavras-chave: *controle de ruído, acústica de salas, simulações numéricas*

1. INTRODUÇÃO

O som se caracteriza por flutuações de pressão em um meio compressível. No entanto, não são todas as flutuações de pressão que produzem a sensação de audição quando atingem o ouvido humano. A sensação de som só ocorrerá quando a amplitude destas flutuações e a frequência com que elas se repetem estiver dentro de determinada faixa de valores (Gerges, 2000).

Desenvolver um estudo acústico de maneira a prever o comportamento do ambiente em relação às alterações realizadas requer um modelo de simulação. Tal modelo deverá corresponder de maneira fidedigna à realidade, predizendo se os parâmetros acústicos do ambiente estão, ou não, em acordo com um padrão de excelência para uma dada finalidade. As equações clássicas da acústica de salas não permitem a obtenção de soluções exatas quando as salas assumem geometria não retangular, ou quando certas idealizações não podem ser consideradas (Melo *et al.*, 2007). Portanto, no estudo de salas com geometrias complexas, faz-se uso de métodos numéricos de grande eficácia, como o método de traçado de raios e de fonte imagem especular (Moraes, 2007), que podem ser utilizados conjuntamente na forma de um método híbrido, o qual otimiza suas características, associando a natureza determinística do método da fonte imagem, com algumas características estatísticas do método de raios acústicos (Souza, 1997).

Assim, o presente trabalho aborda a simulação de um ambiente piloto, a saber, o piso das turbinas de uma usina hidrelétrica de pequeno porte, para o qual foram constatados níveis de ruído de até 102 dBA, provocando desconforto acústico em seus colaboradores, devido à inadequação frente às normas Brasileiras vigentes (NR-15).

O *software* comercial utilizado para a realização das simulações de determinação dos parâmetros acústicos no ambiente modelo foi o Odeon, versão 9.2. Trata-se de um *software* com grande aceitação em pesquisas nacionais e internacionais, além de ser o *software* disponível na infraestrutura do Grupo de Vibrações e Acústica (GVA) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

2. MÉTODOS NUMÉRICOS

A seguir, são descritas as principais informações a respeito do método híbrido mencionado acima, o qual representa uma otimização das soluções levadas em considerações para os métodos da fonte imagem e de traçado de raios, utilizadas para reduzir ainda mais o custo computacional dos modelos desenvolvidos.

2.1. Método da Fonte Imagem

Neste método, fontes espaciais virtuais são criadas a partir da consideração das superfícies do ambiente como espelhos (ver Fig. 1).

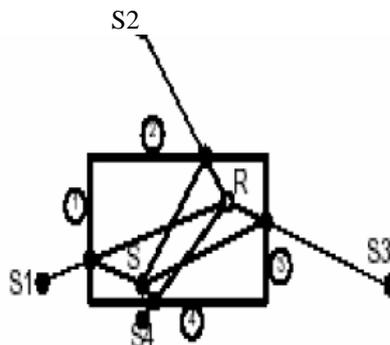


Figura 1. Fontes imagem de primeira ordem.

Apesar de estar baseado em uma teoria razoavelmente simples, o que reduz seu custo computacional, o método híbrido de raios acústicos e fontes imagem possui limitações que podem demandar um longo tempo de processamento. Tais limitações incluem: teste de visibilidade de fontes sonoras por parte de receptores de som (como visto na Fig. 2) para salas não retangulares; presença de objetos na sala e/ou salas muito irregulares, que tornam o modelo complexo por conta do excesso de superfícies.

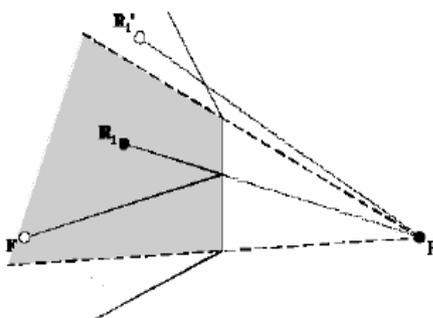


Figura 2. Teste de visibilidade para salas não retangulares.

2.2. Método de Traçado de Raios

No método de traçado de raios, admite-se a energia emitida pela fonte distribuída em um número discreto de raios. Dessa forma, cada raio possui a energia emitida pela fonte dividida pelo número de raios emitidos e, cada um, viaja com velocidade equivalente à velocidade do som até colidir com as superfícies internas à sala. Por meio dos fenômenos da reflexão sonora (difusa ou especular) e absorção sonora (inclusive do ar), os raios acústicos vão perdendo energia, enquanto viajam da fonte sonora a um receptor (ver Fig. 3). Quando estes raios não possuem mais níveis significativos de energia são então desconsiderados, dando início a uma nova seção de lançamento de novos raios.

Para calcular a energia sonora em pontos distintos de uma sala, é distribuída uma malha de receptores constituída de volume finito que identifica os raios que a cruzam. Determinando o número de raios que cruza a malha finita de receptores e a contribuição energética de cada um, em cada ponto, pode-se então determinar o nível de pressão sonora (NPS) correspondente àquela posição.

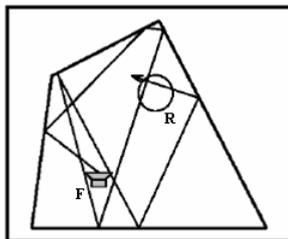


Figura 3. Traçado de um raio acústico da fonte sonora (F) ao receptor (R).
Fonte: Raynoise (1993).

3. RUÍDO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

O ruído se tornou uma grande preocupação em ambientes industriais, a partir do momento em que se elevou o número de trabalhadores com Perda Auditiva Induzida pelo Ruído (PAIR). Esta perda normalmente é registrada em casos de trabalhadores que não somente tiverem sua exposição a um nível de ruído intenso, mas também por um longo tempo de exposição.

A fim de se enfrentar o problema, hoje são realizados estudos para controle de ruído em ambientes industriais, com base em normas regulamentadoras que buscam inibir o excessivo número de trabalhadores expostos a elevados níveis de ruído e por tempos prolongados.

A norma regulamentadora NR-15, trata de atividades e operações insalubres e estabelece a máxima exposição diária ao ruído, de acordo com a Tab. 1.

Tabela 1. Exposição ao ruído com base na NR-15.

NÍVEL DE RUÍDO dBA	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
90	4 horas
95	2 horas
100	1 hora
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

4. AMBIENTE INVESTIGADO

O ambiente em questão é o piso das turbinas de uma usina hidrelétrica da CHESF/Regional Paulo Afonso. O piso das turbinas escolhido para o desenvolvimento deste estudo foi o da usina Paulo Afonso I (PA I), que tem como características importantes o modo e o local em que foi construída.

A usina em estudo foi construída em meio a um ambiente rochoso, reforçadas com colunas de concreto. O piso do ambiente também é feito de concreto, além de contar com a presença do maquinário em geral. O piso ainda tem como característica fundamental a sua área que é de 51 x 15 m², aproximadamente, de acordo com a planta baixa fornecida pela referida empresa.

4.1. Parâmetros Acústicos

4.1.1. Nível de Pressão Sonora

O nível de pressão sonora (*NPS*) é a medida física preferencial para caracterizar a sensação subjetiva da intensidade dos sons, sendo calculado através do valor eficaz da pressão sonora, P_{rms} , em comparação ao valor de pressão sonora de referência, P_0 (Bistafa, 2006):

$$NPS = 10 \log \left(\frac{P_{rms}}{P_0} \right)^2 \quad (1)$$

4.1.2. Nível Equivalente

Quando se deseja registrar um nível de pressão sonora que represente um valor médio, durante certo tempo de medição, então deve-se calcular o nível equivalente de ruído, L_{eq} , através da seguinte expressão:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_p(t)/10} dt \right], \quad (2)$$

onde $L_p(t)$ é o nível sonoro no instante t , enquanto T representa o período de medição. Caso o $L_p(t)$ seja um nível sonoro com ponderação A , então o nível equivalente é representado por L_{Aeq} , sendo expresso em dBA.

4.1.3. Nível de Potência Sonora

As medições de potência sonora são importantes porque, através desta se pode calcular o nível de pressão sonora em qualquer posição do ambiente, desde que o tamanho deste ambiente, sua forma e absorção sonora de suas fronteiras sejam conhecidas. O valor da potência sonora não é função do meio de propagação já que a potência sonora refere-se à energia emitida pela fonte. O nível de potência sonora é dado pela equação:

$$NWS = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right), \quad (3)$$

onde W é a potência sonora em watts e W_0 é o valor de potência sonora de referência (igual a 10^{-12} watt).

4.2. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS

Em uma fase preliminar de investigação acústica, foram utilizados os equipamentos para medição de níveis de ruído, apresentados na Fig. 4. Para as medições dos níveis de ruído no interior do piso das turbinas, utilizou-se um analisador de sinais de quatro canais (Fig. 4a), o qual possui grande precisão e estabilidade ao longo do tempo, além de funcionar como um analisador em tempo real, ou seja, quando são realizadas medições em bandas de frequência, todas as bandas são adquiridas simultaneamente, de modo que as medições se tornam muito mais rápidas e confiáveis.

O microfone utilizado (Fig. 4b) consiste num microfone de precisão científica, com resposta em frequência praticamente plana ao longo de toda a faixa audível. Trata-se de um microfone de campo difuso, o qual responde a ondas sonoras que nele incidem, provenientes de todas as direções, com igual sensibilidade, o que é adequado para medições em ambientes fechados com superfícies acusticamente refletoras, tal como é o caso do piso das turbinas sob investigação.

Dessa forma, o microfone de campo difuso é conectado ao analisador, o qual é conectado a um computador (Fig. 4c), onde se encontra o *software* que controla o analisador. O sistema de aquisição foi configurado para medir o nível de ruído em bandas de 1/3 de oitava, de 20 a 20.000 Hz, com ponderação linear em frequência e durante um período de 10 s, o que se mostrou suficiente devido ao caráter estacionário do ruído produzido no interior do ambiente.

Foram medidos ainda os níveis globais com ponderação A , além do espectro do ruído em banda estreita, de forma simultânea, para cada ponto investigado.

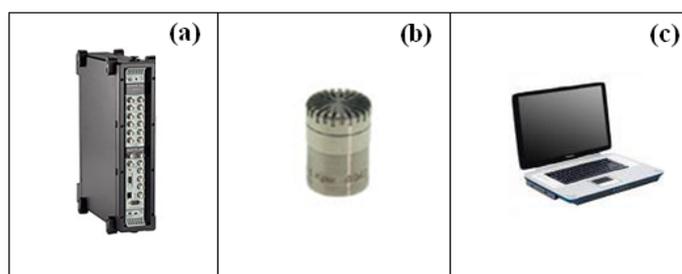


Figura 4. Equipamentos utilizados na investigação experimental: (a) Analisador de Sinais de 04 canais tipo Pulse da B&K; (b) Microfone de campo difuso de 1/2" tipo 4942 da B&K; Notebook com *software* Labshopview para controle do Analisador Pulse.

5. ANÁLISE NUMÉRICA

Nesta etapa do trabalho foi desenvolvida a geometria do piso das turbinas da PA I em ambiente computacional, com as características as mais fiéis possíveis, em relação à sala real, utilizando-se ferramentas de CAD. Dessa forma, construiu-se um modelo numérico com área de piso igual a $51 \times 15 \text{ m}^2$, tal como descrito anteriormente, e buscando-se levar em consideração a presença do maquinário/painéis de controle existentes neste ambiente (ver Fig. 5).

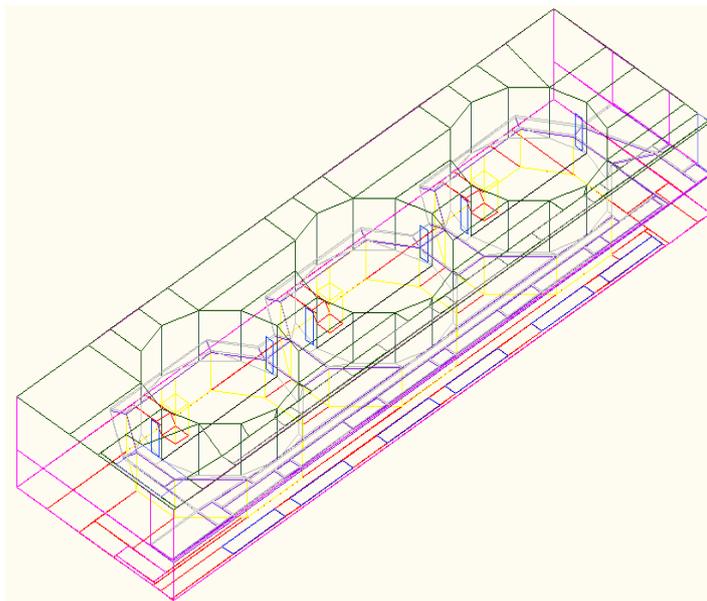


Figura 5. Vista isométrica do piso das turbinas da PA I.

No modelo apresentado na Fig. 6, podem-se observar as principais características da geometria da sala, estando indicadas, em vermelho, as posições das fontes acústicas, além de 38 posições de microfones, em azul, localizados aproximadamente nas mesmas posições em que foram realizadas as medições de níveis de ruído *in loco*. Neste modelo, foram utilizados coeficientes de absorção sonora com valores abaixo de 5% nas superfícies internas da sala, caracterizando superfícies acusticamente refletoras.

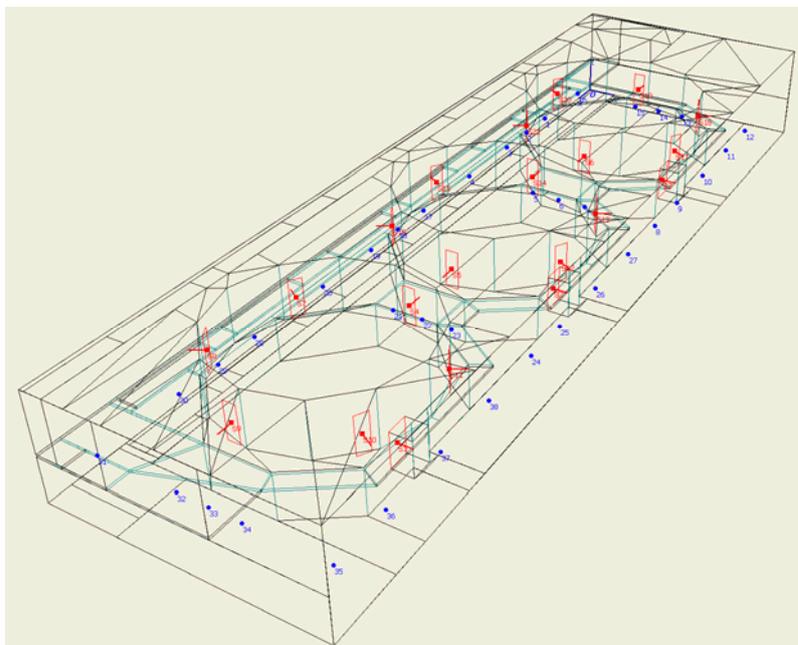


Figura 6. Modelo do piso da turbina da PA I no software Odeon de simulações acústicas.

Comparando os resultados de *NPS* experimentais com aqueles fornecidos pelo modelo numérico do piso das turbinas da PA I, com fontes sonoras devidamente atribuídas, observa-se que o modelo foi capaz de reproduzir a

tendência global dos resultados experimentais, tal como pode ser observado na Fig. 7, cujos dados também estão apresentados na Tab. 2 para maior clareza.

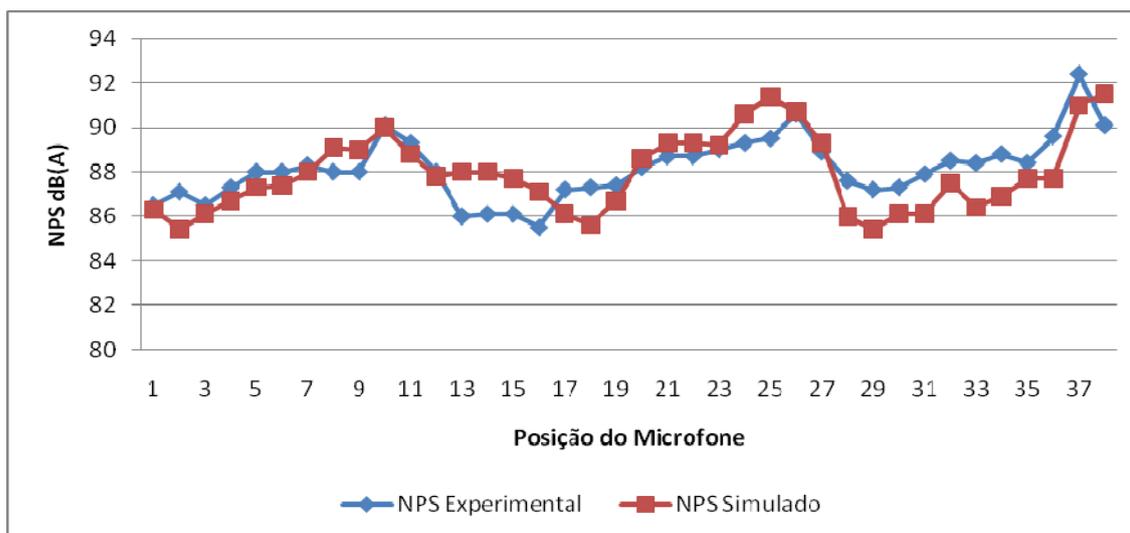


Figura 7. Gráfico comparativo de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o piso da turbina da usina PA I. Dados experimentais versus resultados numéricos.

Tabela 2. Resultados da Fig. 7, incluindo a diferença entre os níveis sonoros. Valores em dBA.

Receptor	NPS Experimental (dBA)	NPS Simulado (dBA)	Diferença (dBA)
1	86,5	86,3	0,2
2	87,1	85,4	1,7
3	86,5	86,1	0,4
4	87,3	86,7	0,6
5	88	87,3	0,7
6	88	87,4	0,6
7	88,3	88	0,3
8	88	89,1	-1,1
9	88	89	-1
10	90,1	90	0,1
11	89,3	88,8	0,5
12	88	87,8	0,2
13	86	88	-2
14	86,1	88	-1,9
15	86,1	87,7	-1,6
16	85,5	87,1	-1,6
17	87,2	86,1	1,1
18	87,3	85,6	1,7
19	87,4	86,7	0,7
20	88,2	88,6	-0,4
21	88,7	89,3	-0,6
22	88,7	89,3	-0,6
23	89	89,2	-0,2
24	89,3	90,6	-1,3
25	89,5	91,4	-1,9
26	90,6	90,7	-0,1
27	88,9	89,3	-0,4
28	87,6	86	1,6
29	87,2	85,4	1,8
30	87,3	86,1	1,2
31	87,9	86,1	1,8
32	88,5	87,5	1
33	88,4	86,4	2
34	88,8	86,9	1,9
35	88,4	87,7	0,7
36	89,6	87,7	1,9
37	92,4	91	1,4
38	90,1	91,5	-1,4

Da Fig. 7, observa-se ainda que os níveis de pressão sonora simulados são consideravelmente próximos aos experimentais. Isso valida o modelo desenvolvido, permitindo o teste de soluções virtuais de controle de ruído no ambiente sob estudo, a fim de adequá-lo à NR-15.

Uma vez que os dados numéricos foram validados, haja vista a concordância com os dados obtidos experimentalmente, pôde-se então dar início à fase de simulações de soluções virtuais de controle de ruído para tornar o ambiente investigado acusticamente salubre.

Como propostas de soluções foram sugeridos e simulados os seguintes procedimentos: absorção em todas as paredes e teto do ambiente (feita com painéis acústicos do tipo lã de rocha com 100 mm de espessura) e construção de entradas em formato de “L” (com e sem revestimento acústico interno) defronte às entradas das salas das turbinas (ver Fig. 8, além de combinações destas últimas. Os resultados estão mostrados na Tab. 3.



Figura 8. Vista do modelo desenvolvido, mostrando detalhe das entradas em forma de “L”, em frente às salas das turbinas.

Tabela 3. Resultados das simulações de soluções virtuais de controle de ruído para a PA I.

Soluções Virtuais	NPS (dBA) médio do ambiente ANTES	NPS (dBA) médio do ambiente DEPOIS	Redução média do ruído (dBA)
Absorção nas paredes e teto	87,2	73,8	13,4
Entradas em forma de “L”, sem absorção interna	87,2	86,3	0,9
Entradas em forma de “L”, com absorção interna	87,2	80,8	6,3
Absorção nas paredes e teto, além de entradas em forma “L” sem absorção interna	87,2	70,6	16,6
Absorção nas paredes e teto, além de entradas em forma de “L” com absorção interna	87,2	64,8	22,4

6. CONCLUSÕES

A partir da visualização da tabela anterior, nota-se que o ambiente escolhido para o estudo passa a atender à NR-15, após a implementação de praticamente qualquer um dos tratamentos propostos, os quais indicam a possibilidade de

serem alcançadas reduções significativas dos níveis de ruído no ambiente, à exceção da construção de uma entrada em forma de “L”, defronte às portas dos poços das turbinas, sem a utilização de revestimento acústico interno.

Porém, não foi utilizado somente este aspecto para se definir uma solução de tratamento ideal, uma vez que para esta escolha deve-se avaliar, ainda, a viabilidade de implementação do tratamento e, também, o seu custo/benefício.

A solução a partir da utilização de material absorvedor acústico nas paredes e teto do ambiente permitiram estimar uma redução de nível sonoro da ordem de 13 dBA. Na prática, entretanto, espera-se uma redução em torno de 10 dBA para uma solução deste tipo, que é o valor normalmente observado quando se utiliza uma grande quantidade de material absorvedor numa sala de uma só vez.

Analisados e conferidos os aspectos mencionados, notou-se que a construção de entradas em forma de “L” (defronte às portas dos poços das turbinas com absorção interna) seria ideal para a adequação do ambiente às normas vigentes, haja vista que possibilitou uma redução de nível de pressão sonora para um valor menor que 85 dBA (81 dBA, em média), apresentando uma redução média de 6,3 dBA em relação aos níveis originais. Adicionalmente, dentre as propostas consideradas, tal solução foi percebida como a mais viável, por se valer de uma maior simplicidade em sua implementação, além do baixo custo relativo às outras propostas.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pela concessão de bolsas de graduação e mestrado, respectivamente.

8. REFERÊNCIAS

- Bistafa, S.R., 2006, “Acústica Aplicada ao Controle de Ruído”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil.
- Cardoso, H.F.S., 2008, “Desenvolvimento de Enclausuramento Parcial Através de Métodos Numéricos para Controle de Ruído de Grupos Geradores em uma Usina Termoeletrica da Eletronorte”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil.
- Melo, G.S.V., 2002, “Measurement and Prediction of Sound Absorption of Room Surfaces and Contents at Low Frequencies”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Vieira, R.J.A., 2008, “Desenvolvimento de Painéis Confeccionados a Partir de Fibras de Coco para Controle Acústico de Recintos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil.
- Odeon ver 9.2, 2009, “User Manual”, Bruel & Kjaer, Dinamarca.
- Gerges, S.N.Y., 2000, “Ruído: Fundamentos e Controle”, NR Editora, Florianópolis, Brasil.
- Raynoise, 1993, “User Manual”, Numerical Integration Technologies, Bélgica.
- Sousa, M.C.R., 1997, “Previsão do Ruído em Salas por Raios Acústicos e Ensaios Experimentais”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

DEVELOPMENT OF NUMERICAL MODEL FOR ACOUSTICAL ADEQUACY OF THE TURBINE FLOOR OF A HYDROELECTRIC POWER PLANT

Abstract: *The production process in power plants generally occurs in environments with high sound pressure levels. Levels above 85 dBA, for example, are easily observed in these spaces. Unfortunately, in most cases a significant part of the employees involved have already developed some type of hearing loss due to noise exposure. Thus, there is a need to develop a methodology to control noise in different environments of hydroelectric plants, based on building a computational model equivalent to the real environment. Using a commercially available computer program it was determined the sound pressure levels in various parts of the investigated environment in the form of an acoustic map. The numerical model was validated from comparisons with experimental results, allowing the testing of virtual solutions for noise control, which could be implemented in situ.*

Keywords: *noise control, room acoustics, numerical simulations.*