

# Precisão dos Métodos Analíticos na Predição de Níveis de Potência Sonora para Motores Elétricos

Mateus, D.A.\*; Duarte, J.B.\*; Oliveira Filho, R. H.\*; Duarte, M. A. V.\*

\*Laboratório de Acústica e Vibrações, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, danilomateus@mec.ufu.br

## Resumo

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre métodos analíticos para a previsão de níveis de ruído gerados por motores elétricos advindos de obras de autores renomados no campo do controle de ruído industrial: Samir N. Y. Gerges, David A. Bies e Colin H. Hansen, Randall F. Barron. Como objetivo fundamental decidiu-se por comparar os métodos analíticos de previsão de ruído entre si e com a identificação prática das respectivas fontes: motores elétricos, evidenciando assim, o método mais conveniente a ser utilizado em simulações computacionais de ruído em plantas industriais. Para tanto, os resultados obtidos teoricamente, com o uso das equações desenvolvidas pelos pesquisadores foram comparados com os obtidos experimentalmente em campo, resultados estes que estavam armazenados em um banco de dados. Concluiu-se que não existe uma única metodologia que atenda plenamente todas as categorias de motores elétricos. Considerando o porte dos motores, as metodologias com menores erros comparativos aos valores experimentais, foram: pequeno porte - Bies e Hansen, médio porte - Barron, e grande porte - Bies and Hasen.

## Abstract

In this work was carried out a comparative study between analytical methods to predict the noise levels generated by electrical motors. These methods are those from renowned researchers in the field of industrial noise control: Samir N. Y. Gerges, David A. Bies and Colin H. Hansen, Randall F. Barron. The main objective was to compare the analytical predictive methods among themselves, and with experimental measurements of sources: electrical motors. Thus, one can identify the more accurate computational method for noise simulations in industrial plants. The theoretical simulated results based on the equations developed by the researchers were compared with the experimental results. The authors draw a conclusion that there is no single methodology which can be applied to all types of electrical motors with good results. Considering the size of the electrical motors the theoretical methods with smaller errors comparing to the experimental results were: small size – Bies and Hansen, medium size – Barron, and big size - Bies and Hansen.

**Palavras-chave:** Simulação acústica, previsão de ruído, métodos analíticos.

## 1. Introdução

Motores elétricos são complexas fontes geradoras de ruído devido às vibrações de seus componentes e ao fluxo turbulento de ar na refrigeração [1].

O ruído gerado por um único motor elétrico geralmente não é excessivo; entretanto, um grande número de motores elétricos pode estar presente em um local específico. Nesse caso, o ruído total gerado por vários motores pode ser significativo [2].

Observando-se o caso dos motores elétricos pelas mesmas abordagens de Gerges e de Barron, pode-se entender a dificuldade em sintetizar uma equação para o ruído total por eles gerado e, a necessidade de se obter uma fórmula com precisão aceitável para estimar o nível de ruído emanado por tais equipamentos. Nesse trabalho será realizado um estudo comparativo entre os métodos analíticos para previsão do ruído em motores elétricos, apresentados em obras no campo do controle de ruído

industrial. Com o intuito de identificar o método mais eficaz, comparou-se os resultados obtidos através da teórica com valores obtidos experimentalmente (identificação em campo).

## 2. Metodologia

No estudo do ruído em motores elétricos, os mesmos são divididos em motores TEFC – Totally Enclosed Fan Cooled Motors: Motores Totalmente Fechados Resfriados por Ventilador – e motores DRPR – Drip-Proof Motors: Motores à Prova de Respingos (são motores abertos, cujo resfriamento é realizado naturalmente, ou seja, sem um dispositivo próprio para esse fim). Neste trabalho, os motores identificados experimentalmente para comparação com os métodos analíticos são todos do tipo TEFC. A identificação dos mesmos foi realizada por pessoal capacitado em uma grande indústria nacional, cujo nome não será revelado devido ao sigilo industrial.

Barron (2003) faz, além da divisão do tipo do motor, outra de acordo com a potência do mesmo. Utilizando tal abordagem, são sugeridas duas equações para estimar os níveis de potência sonora gerados por motores elétricos: a equação (1) é utilizada para motores elétricos com potência igual ou inferior a 5 hp e a equação (2) para os demais motores elétricos. A tabela 1 é fornecida por Barron para ajuste dos valores obtidos através de suas equações para bandas de oitava em dB (representadas pelas frequências centrais de cada banda).

$$L_w = 78 \text{ dB(A)} \quad (1)$$

$$L_w = 20 \log_{10}(hp) + 15 \log_{10}(n_r) + 13 \text{ dB(A)} \quad (2)$$

onde  $L_w$  representa o nível de ruído total gerado pelo motor elétrico em dB(A),  $hp$  indica a potência do motor em horse-power (hp) e  $n_r$  é a rotação do eixo do motor em rotações por minuto (rpm).

Os motores elétricos denominados de médio e de grande porte se encaixam no caso da equação (2), ou seja, são motores com potência nominal superior a 5 hp.

Tabela 1: Fatores de Conversão de Nível de Potência Sonora (NWS) em dB(A) para o NWS, em dB, em bandas de oitava

Tamanho do Motor	Fator de Conversão por Banda de Oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
1 a 250 hp	16	12	8	4	4	8	12	16
300 a 400 hp	21	15	9	3	3	8	15	22
acima de 400 hp	19	13	7	3	3	8	14	22

Bies e Hansen [3] trazem um método análogo ao mostrado por Barron para motores elétricos com potências até 300 kW. Porém, a separação dos mesmos por potência é diferente, sendo a equação (3) para motores abaixo de 40 kW e a equação (4) para motores acima de 40 kW (e, logicamente, abaixo de 300 kW). Essas equações servem para o cálculo do nível de pressão sonora (NPS). Para a obtenção do NWS, deve-se aplicar os NPS à equação (5) e, para a obtenção do mesmo por banda de oitava, os NWS da equação (5) devem ter os valores da Tabela 2 subtraídos de acordo com a frequência e o tipo do motor elétrico (TEFC no caso dos motores estudados). Para motores elétricos com potência superior a 300 kW, Bies e Hansen sugerem uma forma de estimativa diferente, apresentando uma tabela com valores de NWS fixos. Esses valores estão indicados na Tabela 3.

$$L_p = 17 + 17 \log_{10}(kW) + 15 \log_{10}(RPM) \text{ dB} \quad (3)$$

$$L_p = 28 + 10 \log_{10}(kW) + 15 \log_{10}(RPM) \text{ dB} \quad (4)$$

$$NWS = L_p + 11 - 10 \log_{10}(D) \text{ dB} \quad (5)$$

onde  $L_p$  representa o nível de pressão sonora total, em dB,  $kW$  é a potência do motor em kW,  $RPM$  a velocidade de rotação do motor em rpm e  $D$  é o índice de direcionalidade da fonte de ruído (neste trabalho foi adotado o valor de  $D$  igual a 2 para todos os motores, pois estes se localizam sobre um plano).

Tabela 2: Ajuste para Bandas de Oitava do Nível de Potência Sonora Gerado por Motores Elétricos de Pequeno e Médio Porte

Tipo de Motor	Ajuste por Banda de Oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
TEFC	14	11	9	6	6	7	12	20
DRPR	9	7	7	6	9	12	18	27

Tabela 3: Níveis de Potência Sonora para Motores Elétricos de Grande Porte em dB.

Banda de Oitava	1800 e 3600 rpm	1200 rpm	900 rpm	Até 720 rpm
63 Hz	96	90	90	90
125 Hz	96	92	92	92
250 Hz	98	93	93	93
500 Hz	98	93	93	93
1 kHz	98	93	96	98
2 kHz	98	98	96	92
4 kHz	95	88	88	83
8 kHz	88	81	81	75

Para motores com potência superior a 4000 kW, os valores da Tabela 3 devem ser acrescidos em 3 dB e para motores cuja potência esteja compreendida entre 300 kW e 750 kW, devem ser subtraídos 3 dB dos valores da mesma tabela.

Gerges (2000) sugere duas equações similares para o caso, uma desenvolvida por Bolt-Beranek e outra proposta pela Associação Nacional de Fabricantes de Equipamentos Elétricos dos E.U.A. (NEMA). Pela similitude das duas, será analisada apenas a equação (6) de Bolt-Beranek que é válida somente para motores com potência nominal entre 1 e 500 hp.

$$NWS = K + 20 \log_{10}(HP) + 15 \log_{10}(N) - 7 \text{ dB} \quad (6)$$

onde  $K$  é uma constante retirada da tabela 4,  $HP$  corresponde à potência do motor em hp e  $N$  é a velocidade de rotação do motor em rpm.

Tabela 4: Valores de  $K$  a ser utilizados na Eq. (6)

K	Valores Assumidos de $K$ por Banda de Oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
K	9	13	16	16	16	14	7	0

As potências (hp) e velocidades (rpm) dos motores analisados estão mostradas na Tabela 5.

Tabela 5: Características dos Motores Elétricos Analisados

Motor	Potência (hp)	Velocidade (rpm)
M1	7,5	1800
M2	15	1750
M3	40	3560
M4	50	3570
M5	60	3340
M6	60	3570
M7	60	3540
M8	75	3530
M9	75	1770
M10	100	3570
M11	100	3575
M12	100	3575
M13	100	3565
M14	100	3565
M15	100	3565
M16	100	3570
M17	100	1770
M18	200	3560
M19	300	3580
M20	350	1780
M21	350	1189
M22	400	1180
M23	619,5	3568
M24	3750	1175
M25	7919,8	1785

Para a comparação dos resultados, será utilizado o erro (diferença entre os valores de NWS identificados e teóricos, estes últimos calculados pelas metodologias citadas). Para uma análise mais concisa, serão calculados os valores de desvio padrão entre os erros dos NWS globais.

Em trabalhos de campo, quando são realizadas identificações de fontes sonoras ou mapeamento de áreas, é utilizada a escala de ponderação A para o cálculo do NWS ou do NPS. Dessa forma, optou-se, para as análises de desvio padrão, a utilização de tal ponderação.

### 3. Apresentação e Análise de Resultados

Para a análise dos resultados, foi feita uma divisão de acordo com a potência nominal dos motores. De 1 a 50 hp são classificados como de pequeno porte, de 60 a 200 hp são classificados como de médio porte e acima de 200 hp são considerados de grande porte.

#### 3.1. Motores elétricos de pequeno porte

Para os motores de pequeno porte foram utilizadas as equações (2), (3) e (6) associadas às tabelas 1,2 e 4.

As Tabelas 6, 7 e 8 mostram, respectivamente, os resultados de NWS obtidos utilizando os métodos analíticos de Barron, Bies e Hansen e Gerges. Para a análise da precisão desses resultados, foram utilizados dados experimentais, apresentados na Tabela 9.

Tabela 6: Níveis de Potência Sonora Estimados pelo Método de Barron para Motores Elétricos de Pequeno Porte

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M1	64	68	72	76	76	72	68	64
M2	70	74	78	82	82	78	74	70
M3	83	87	91	95	95	91	87	83
M4	85	89	93	97	97	93	89	85

Tabela 7: Níveis de Potência Sonora Estimados pelo Método de Hansen e Bies para Motores Elétricos de Pequeno Porte

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M1	73	76	78	81	81	80	75	77
M2	77	80	82	85	85	84	79	71
M3	89	92	94	97	97	96	91	83
M4	91	94	96	99	99	98	93	85

Tabela 8: Níveis de Potência Sonora Estimados pelo Método de Gerges para Motores Elétricos de Pequeno Porte

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M1	68	72	75	75	75	73	66	59
M2	74	78	81	81	81	79	72	65
M3	87	91	94	94	94	92	85	78
M4	89	93	96	96	96	94	87	80

Tabela 9: Níveis de Potência Sonora de Motores Elétricos de Pequeno Porte Identificados em Campo

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M1	82	84	85	85	82	79	71	66
M2	80	75	79	87	85	84	83	80
M3	84	86	92	102	100	99	94	87
M4	88	95	99	101	101	100	97	96

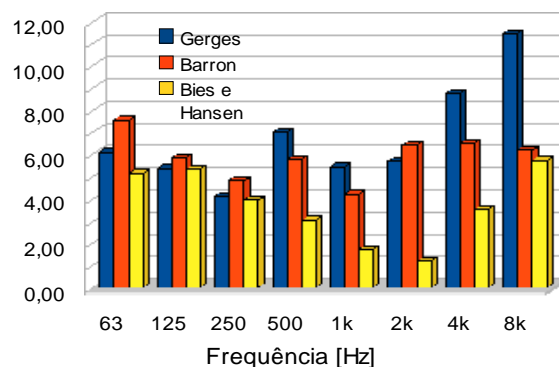


Figura 1: Desvios dos Métodos Analíticos para Motores Elétricos de Pequeno Porte

A figura 1 indica os desvios médios, por banda de oitava, para os NWS estimados pelos métodos analíticos em relação aos valores identificados.

Pela análise da figura 1, observa-se que o método proposto por Bies e Hansen apresentou os menores desvios em toda faixa de frequência. Barron tem um

comportamento mais homogêneo, porém seu erro médio é grande quando comparado ao método de Bies e Hansen. Já o método proposto por Gerges apresentou os maiores desvios para altas frequências.

### 3.2. Motores elétricos de médio porte

Para os motores de médio porte foram utilizadas as equações (2), (4) e (6) associadas às tabelas 1,2 e 4.

As tabelas 10, 11 e 12 mostram, respectivamente, os resultados de NWS obtidos utilizando a metodologia apresentada. Para a análise da precisão desses resultados, foram utilizados dados experimentais, mostrados na Tabela 13.

Tabela 10: Níveis de Potência Sonora Estimados pelo Método de Barron para Motores Elétricos de Médio Porte

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M5	87	91	95	99	99	95	91	87
M6	87	91	95	99	99	95	91	87
M7	87	91	95	99	99	95	91	87
M8	89	93	97	101	101	97	93	89
M9	84	88	92	96	96	92	88	84
M10	91	95	99	103	103	99	95	91
M11	91	95	99	103	103	99	95	91
M12	91	95	99	103	103	99	95	91
M13	91	95	99	103	103	99	95	91
M14	91	95	99	103	103	99	95	91
M15	91	95	99	103	103	99	95	91
M16	91	95	99	103	103	99	95	91
M17	91	95	99	103	103	99	95	91
M18	87	91	95	99	99	95	91	87

Tabela 11: Níveis de Potência Sonora Estimados pelo Método de Hansen e Bies para Motores Elétricos de Médio Porte

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M5	91	94	96	99	98	98	93	85
M6	92	95	97	100	100	99	94	86
M7	92	95	97	100	100	99	94	86
M8	93	96	98	101	101	100	95	87
M9	88	91	93	96	96	95	91	87
M10	94	97	99	102	102	101	96	88
M11	94	97	99	102	102	101	96	88
M12	94	97	99	102	102	101	96	88
M13	94	97	99	102	102	101	96	88
M14	94	97	99	102	102	101	96	88
M15	94	97	99	102	102	101	96	88
M16	94	97	99	102	102	101	96	88
M17	89	92	94	97	97	96	91	83
M18	97	100	102	105	105	104	99	91

A figura 2 mostra os desvios médios, por banda de oitava, para os NWS estimados pelos métodos analíticos em relação aos valores identificados.

Tabela 12: Níveis de Potência Sonora Estimados pelo Método de Gerges para Motores Elétricos de Médio Porte

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M5	90	94	97	97	97	95	88	81

M6	91	95	98	98	98	96	89	82
M7	91	95	98	98	98	96	89	82
M8	93	97	100	100	100	98	91	84
M9	88	92	95	95	95	93	86	79
M10	95	99	102	102	102	100	93	86
M11	95	99	102	102	102	100	93	86
M12	95	99	102	102	102	100	93	86
M13	95	99	102	102	102	100	93	86
M14	95	99	102	102	102	100	93	86
M15	95	99	102	102	102	100	93	86
M16	95	99	102	102	102	100	93	86
M17	91	95	98	98	98	96	89	82
M18	101	105	108	108	108	106	99	92

Tabela 13: Níveis de Potência Sonora de Motores Elétricos de Médio Porte Identificados em Campo

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M5	88	95	99	101	101	100	97	96
M6	86	88	93	98	96	96	88	85
M7	86	87	92	96	96	93	86	82
M8	88	87	89	99	99	97	93	88
M9	85	98	91	96	97	96	91	86
M10	88	90	91	100	90	91	84	80
M11	84	87	92	96	98	95	88	84
M12	87	92	95	101	100	98	94	91
M13	87	92	95	101	100	98	94	91
M14	87	90	97	102	102	100	94	93
M15	87	90	97	102	102	100	94	93
M16	87	90	97	102	102	100	94	93
M17	88	95	97	102	102	99	91	84
M18	113	106	101	92	95	93	89	82

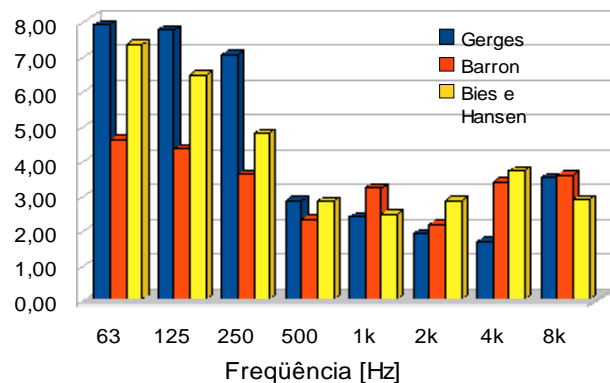


Figura 2: Desvios dos Métodos Analíticos Para Motores Elétricos de Médio Porte

Pela análise da figura 2, observa-se que o método proposto por Gerges apresenta melhores resultados para médias e altas frequências. Já para as baixas frequências este método, juntamente com o de Bies e Hansen, apresenta os maiores desvios. O método proposto por Barron apresenta um comportamento mais homogêneo (menor erro médio) em todas as bandas de frequência.

### 3.3. Motores elétricos de grande porte

Para os motores de grande porte foram utilizadas as equações (2), (4) e (6) associadas às tabelas 1,2, 3 e 4.

As tabelas 14, 15 e 16 mostram, respectivamente, os resultados de NWS obtidos utilizando a metodologia apresentada. Na tabela 16, nota-se a ausência dos níveis de potência sonora para os motores **M23, M24 e M25**, isso se deve ao fato do método analítico apresentado em [1] ser restrito a motores com potência inferior ou igual a 500 hp.

Tabela 14: Níveis de Potência Sonora Estimados pelo Método de Barron para Motores Elétricos de Grande Porte

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M19	97	101	105	109	109	105	101	97
M20	97	103	109	115	115	110	103	96
M21	93	99	105	111	111	106	99	92
M22	91	97	103	109	109	104	97	90
M23	105	111	117	121	121	116	110	102
M24	113	119	125	129	129	124	118	110
M25	122	128	134	138	138	133	127	119

Tabela 15: Níveis de Potência Sonora Estimados pelo Método de Hansen e Bies para Motores Elétricos de Grande Porte

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M19	99	102	104	107	107	106	101	93
M20	95	98	100	103	103	102	97	89
M21	92	95	97	100	100	99	94	86
M22	93	96	98	101	101	100	95	87
M23	93	95	95	95	95	95	92	85
M24	90	92	93	93	93	98	88	81
M25	99	101	101	101	101	101	98	81

Tabela 16: Níveis de Potência Sonora Estimados pelo Método de Gerges para Motores Elétricos de Grande Porte

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M19	105	109	111	112	112	110	103	96
M20	102	106	108	109	109	107	100	93
M21	99	103	105	106	106	104	97	90
M22	100	104	106	107	107	105	98	91

Tabela 17: Níveis de Potência Sonora de Motores Elétricos de Grande Porte Identificados em Campo

Motor	NWS em bandas de oitava [dB]							
	65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
M19	96	109	98	102	105	102	94	86
M20	91	94	104	121	105	99	94	90
M21	101	97	96	96	93	87	81	75
M22	103	99	98	98	95	89	83	76
M23	87	90	95	93	94	93	85	86
M24	92	98	97	103	105	107	103	92
M25	94	95	94	86	90	99	91	85

Para a análise da precisão dos resultados apresentados nas tabelas 14, 15 e 16 foram utilizados dados experimentais, mostrados na Tabela 17.

A figura 3 mostra os desvios médios, por banda de oitava, para os NWS estimados pelos métodos analíticos em relação aos valores identificados.

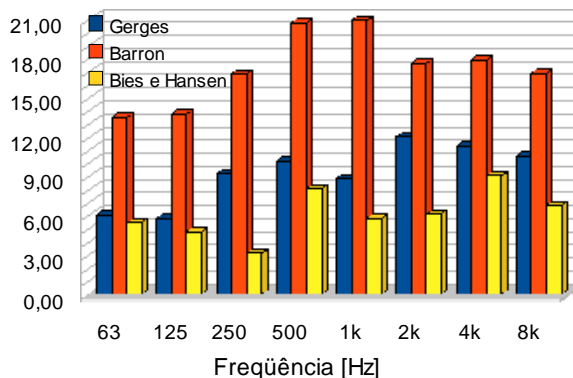


Figura 3: Desvios dos Métodos Analíticos Para Motores Elétricos de Grande Porte

Pela análise da figura 3, observa-se que o método proposto por Barron apresenta os maiores erros para todas as frequências. Os outros dois métodos apresentam menores desvios, porém o método proposto por Bies e Hansen apresenta melhor comportamento.

Como o método proposto por Gerges era limitado para motores acima de 500 hp, optou-se por aplicar o mesmo limite aos outros métodos. A figura 4 ilustra uma comparação dos resultados.

Com a limitação imposta (figura 4), os métodos de Bies e Hansen e Barron obtiveram resultados melhores quando comparados à figura 3. Contudo, o método de Barron ainda apresenta os maiores desvios. O método proposto por Bies e Hansen continua apresentando melhor comportamento.

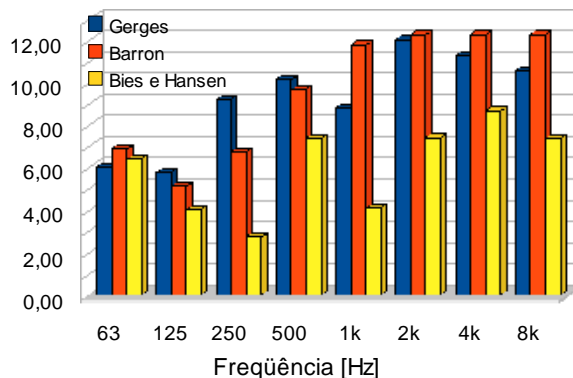


Figura 4: Desvios dos Métodos Analíticos Para Motores Elétricos de Grande Porte Limitados a 500 hp.

### 3.4. Desvio Padrão em dB(A)

Foram calculados os valores globais de NWS para cada equipamento. A partir destes resultados, foram calculados os valores de desvio padrão em relação ao erro médio (diferença entre os métodos analíticos e a identificação) para cada grupo de motores. Os resultados são mostrados na figura 5.

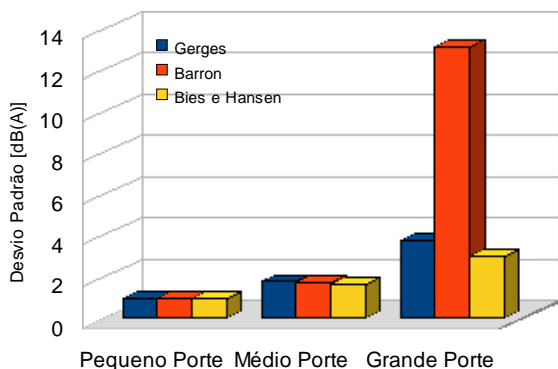


Figura 5: Desvio Padrão em relação ao erro médio para cada metodologia.

Pela análise da figura 5, constata-se claramente que, somente para motores de grande porte, os valores de desvio padrão apresentam diferenças significativas. Destaca-se ainda que o método de Barron apresenta uma maior discrepância em relação aos outros métodos, não sendo recomendado para a previsão do NWS de motores de grande porte.

Limitando-se todos as metodologias à motores de até 500 hp, observa-se uma melhora significativa na metodologia de Barron, como ilustrado na figura 6.

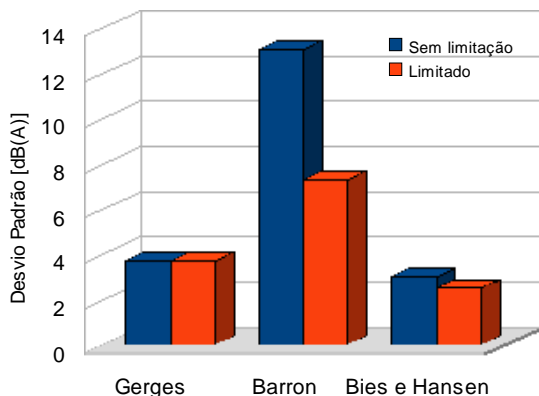


Figura 6: Comparativo entre valores de desvio padrão para as metodologias estudadas com e sem limitação na faixa de potência.

#### 4. Conclusão

A partir da análise dos resultados apresentada, conclui-se que, para motores de pequeno e grande porte, o método que apresentou melhores resultados foi o proposto por Bies e Hansen. Já para motores de médio porte, Barron apresenta uma metodologia mais homogênea em toda faixa de frequência, ou seja, este obteve um menor erro médio quando comparado aos outros métodos.

No desenvolvimento do trabalho, observou-se uma limitação no cálculo de NWS para motores de grande

porte (acima de 500 hp) na metodologia imposta por Gerges. Tal limitação foi aplicada aos outros autores, observando-se uma melhora significativa no método de Barron (diminuição do erro de dB(A), aproximadamente). Apesar dessa melhora, o método ainda é o menos indicado para previsão de NWS de motores de grande porte.

#### Referências

- [1] S. N. Y. Gerges: *Ruído - Fundamentos e Controle 2.ed*: Editora NR Florianópolis-SC, 2000.
- [2] R. F. Barron: *Industrial Noise Control and Acoustic*: Marcel Dekker Inc., New York, 2003.
- [3] D. A. Bies e C. H. Hansen: *Engineering Noise Control: Theory and Practice 3.ed*: London and New York, 2003.