



## CONTROLE ATIVO DE RUÍDO APLICADO A UMA ESTAÇÃO DE COMPRESSÃO DE GÁS

TÉO CERQUEIRA REVOREDO<sup>1</sup>, MICHEL POMPEU TCHEOU<sup>1</sup>, RAFAEL COSMO DE ALMEIDA<sup>1</sup>, VALMIR DOS SANTOS NOGUEIRA JUNIOR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)  
Rua São Francisco Xavier nº 524, Sala 5001-E, Maracanã  
Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, CEP:20550-900

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Instrumentação e Óptica Aplicada (PPGIO)  
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)  
Av. Maracanã, 229, Bloco E, 5º Andar Maracanã – Rio de Janeiro/Rio de Janeiro, Brasil  
Universidade Federal Fluminense (UFF)

Escola de Engenharia - Campus da Praia Vermelha  
Rua Passo da Pátria, 156 - São Domingos - Bloco E - 3º andar, Sala 311 - Niterói - Rio de Janeiro, Brasil

*(Recibido 29 de abril de 2020, para publicación 14 de octubre de 2020)*

**Resumo** – Com base no conceito de controle ativo de ruído, no qual utiliza-se a superposição destrutiva de sinais para cancelamento de ruídos indesejados, este trabalho apresenta a simulação computacional de um sistema para supressão de ruídos em ambiente industrial, tendo como ponto de partida medições realizadas em uma Estação de Compressão de Gás. O algoritmo implementado para a redução de ruído é fundamentado na teoria de filtros adaptativos, aplicando-se filtros com coeficientes variáveis adaptados por algoritmo específico, de modo a obter uma resposta adequada ao objetivo do sistema proposto. O método é explorado de maneira a verificar sua eficácia na atenuação de ruídos específicos, característicos do ambiente em análise, almejando permitir a comunicação entre pessoas em ambientes com níveis elevados de ruído. Os sinais analisados foram adquiridos em campo para melhor representatividade dos resultados. Os resultados alcançados comprovam a possibilidade de aplicação da técnica proposta para supressão de ruídos, embora ressaltem a dificuldade em se filtrar de maneira eficaz os sinais de voz no ambiente estudado.

**Palavras-chave** – Controle Ativo de Ruído, Filtros Adaptativos, Estação de Compressão de Gás.

### 1. INTRODUÇÃO

O ruído é constituído de um grande número de vibrações acústicas com relações de amplitude e fase distribuídas aleatoriamente [1], e produz distúrbios em todo o organismo humano [2]. Não por acaso, há legislações que regulamentam os níveis e tempo de exposição máxima que um trabalhador pode estar submetido em cada ambiente, tornando necessária a implementação de métodos que eliminem ou atenuem estes sons indesejados. Tais métodos de controle do ruído podem ser classificados em duas grandes classes: ativo e passivo.

O controle passivo [3] consiste no isolamento acústico do ambiente através de barreiras mecânicas de materiais isoladores, silenciadores, absorvedores ou amortecedores. É uma técnica eficiente e de baixo custo, quando aplicada em ambientes com ruídos formados por ondas predominantes de média e alta frequência.

O controle ativo de ruído é um método mais indicado para baixas frequências [3], baseado na interferência destrutiva. A partir da análise e do processamento do sinal indesejado (ruído) é gerado outro sinal (antirruído) com a mesma amplitude, porém com fase invertida que, quando somado ao ruído original, o atenua. Para aplicação do método de controle ativo, faz-se necessário um estudo prévio do ambiente com a identificação das possíveis fontes de ruído e verificação de suas faixas de frequência [4].

Nesse contexto, este trabalho apresenta o levantamento e o estudo dos ruídos produzidos em um ambiente industrial, mais especificamente numa Estação de Compressão de Gás Natural. Partindo deste levantamento

e do mapeamento do ambiente, torna-se possível o desenvolvimento de um algoritmo para o controle ativo de ruído, capaz de atenuar o nível sonoro de sinais indesejados, possibilitando comunicação verbal adequada entre os operadores inseridos neste ambiente ruidoso. O algoritmo é capaz de se adaptar a modificações do campo sonoro, mantendo a comunicação verbal viável em diferentes pontos da planta.

## 2. PRINCÍPIO FÍSICO

A propagação de uma onda acústica, com uma amplitude limitada em aproximadamente 140 dB SPL, pode ser considerada um processo linear [5]. Desse modo, a superposição é explorada como princípio básico para o controle ativo de ruído. Duas topologias básicas são geralmente empregadas, a saber: malha fechada e malha aberta [6].

A topologia de malha fechada é exemplificada na Fig. 1. Nesta, o ruído (sinal em traçado contínuo) irradiado pela fonte é atenuado por um sinal antirruído (traçado pontilhado) emitido pelo sistema de controle ativo, o qual tem, idealmente, fase invertida porém amplitude idêntica ao sinal original. O sinal resultante é monitorado pelo microfone, sendo utilizado como referência para ajustes do sistema de controle quando necessário.

No sistema de malha aberta (Fig. 2), o sistema de controle capta o ruído (traçado contínuo) através do microfone de referência, que deve estar localizado o mais próximo possível da fonte cujo sinal deseja-se atenuar. O sistema processa este último, invertendo a sua fase e mantendo a sua amplitude. O sinal antirruído (traçado pontilhado) é, em seguida, gerado pela fonte secundária.

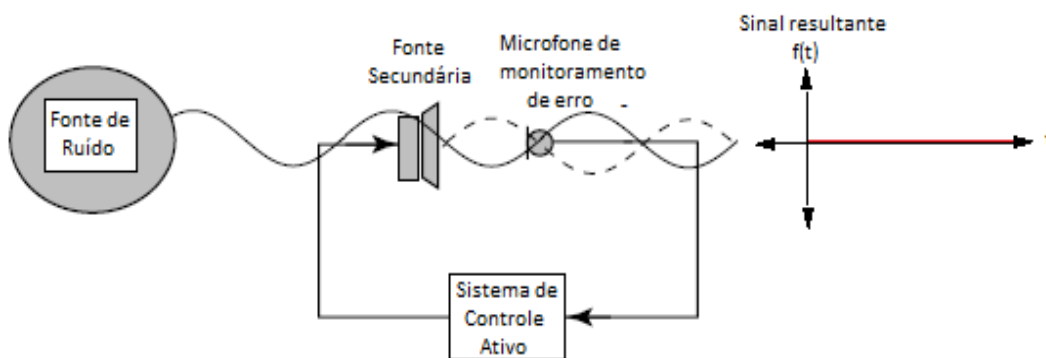


Fig. 1. Sistema de controle ativo de malha fechada.

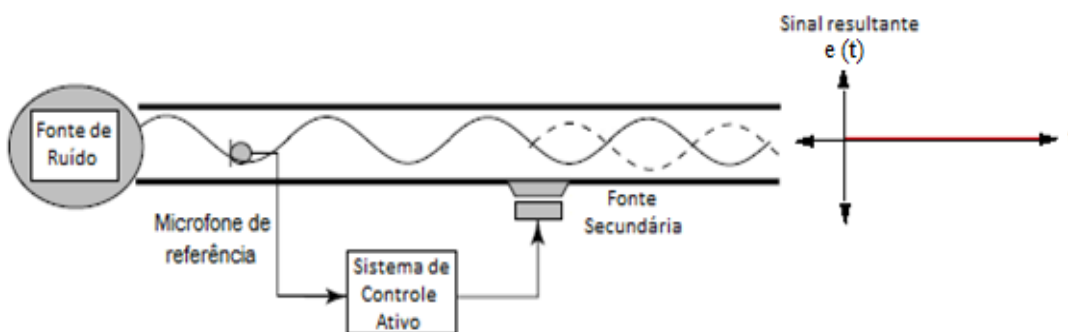


Fig. 2. Sistema de Controle Ativo em malha aberta.

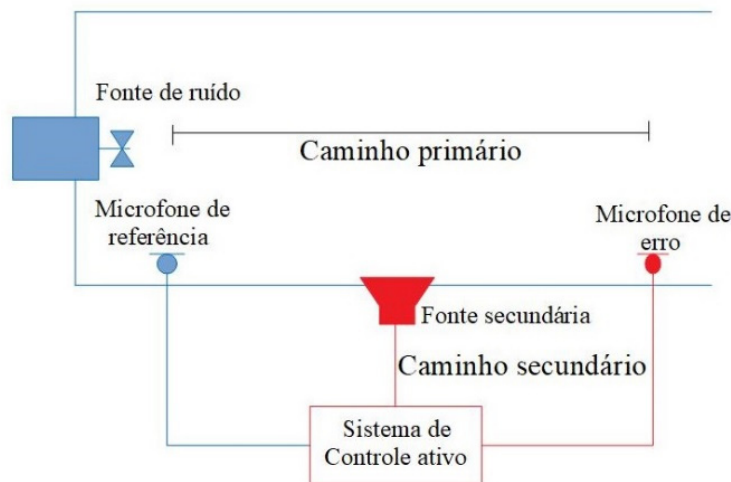


Fig. 3. Caminhos primário e secundário.

O caminho denominado primário é apresentado na Fig. 3. Trata-se de um modelo matemático que prevê as variações que o sinal pode sofrer durante a propagação. O caminho secundário [5] consiste no modelo matemático que contempla todas as características eletroacústicas do microfone de erro, do alto-falante emissor do antirruído e do caminho percorrido entre ambos. Na Fig. 3 são ilustrados todos os componentes que fazem parte da modelagem do caminho secundário.

A modelagem adequada do sistema torna desprezíveis as alterações inseridas pelas defasagens de propagação no resultado final simulado.

### 2.1. Aquisição de dados

O nível de intensidade sonora (NIS) em escala logarítmica e expressa em dB, é uma relação entre a pressão sonora no ambiente e uma pressão sonora de referência, definido por [7] como segue:

$$NIS = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{Pot. \text{ sonora}}{Pot. \text{ de ref.}} \right) dB \quad (1)$$

Na qual NIS é o nível de potência sonora, Pot. Sonora é a potência sonora da fonte emissora, expressa em Watt, e Pot. de ref. é o valor normalizado de 1 picoWatt. Portanto, sendo a potência de referência constante, a principal responsável pela variação do nível de intensidade sonora é a potência oriunda da fonte emissora, ou seja, do equipamento responsável pelo ruído [8].

Os métodos convencionais de controle passivo para supressão de ruído atenuam todas as ondas sonoras, inclusive as geradas pela voz humana, iniciando assim um processo de comprometimento da segurança operacional, dado que a comunicação é crucial. Nesse contexto, a característica de adaptabilidade do controle ativo o torna uma ferramenta atrativa a ser explorada para ambientes industriais, na tentativa de segregar as faixas de frequência que se deseja atenuar.

### 2.2. Filtros Adaptativos

A diferença entre modelos de sistemas físicos e modelos de sistemas idealizados lineares e invariantes no tempo (LIT) podem ser causadas pela variação dos parâmetros dos sistemas no decorrer do tempo, devido a uma variedade de fatores físicos. A ocorrência de mudanças imprevistas nas propriedades estatísticas das entradas externas e das perturbações aplicadas ao sistema podem acarretar mudanças no ambiente em que o sistema opera. A utilização da filtragem adaptativa produz um desempenho satisfatório ao longo de toda a gama de variações nos parâmetros [9]. Algumas técnicas já foram exploradas para sistemas de controle

ativo de ruído, tais como controladores PID, redes neurais artificiais [10], algoritmos genéticos [11], filtros adaptativos lineares [12], entre outros, e os resultados encontrados na literatura são relevantes.

A filtragem adaptativa consiste na aplicação de um filtro cujos coeficientes são adaptados de modo a aproximar o comportamento de um dado sistema desejado, com base em um sinal de referência. O modelo que melhor se adequa é o filtro digital FIR (*Finite Impulse Response*), dada suas características de estabilidade e rápida convergência. Sendo esta última fundamental para atendimento da propriedade do caminho secundário de curta resposta impulsiva. A velocidade de convergência se refere ao tempo de determinação do filtro por meio de algoritmos de otimização.

Para a otimização dos coeficientes do filtro, diversos algoritmos podem ser implementados, dentre os quais destacam-se: NLMS (*Normalized Least Mean Square*), LMS (*Least Mean Square*) e FXLMS (*Filtered X-Least Mean Square*) [13]. Este último é uma derivação do LMS, apresentando como única diferença a aplicação de um sinal filtrado na entrada.

Neste trabalho foram aplicados os métodos FXLMS e NLMS no desenvolvimento de um algoritmo para o controle ativo de ruído de uma Estação de Compressão de Gases.

### 2.3. Algoritmo Filtered-XLMS (F-XLMS)

As defasagens e atenuações inseridas pelo caminho secundário levam à necessidade do tratamento do sinal de entrada, de modo a compensar tais variações [12]. Assim, se faz necessária a implementação do algoritmo F-XLMS. A filtragem ocorre no sinal de entrada com base em um modelo matemático estimado através de um método adaptativo, utilizando o algoritmo NLMS.

Na Fig. 4, o sinal  $x[n]$  (ruído) é obtido diretamente na fonte emissora e  $d[n]$  é o sinal  $x[n]$  incluindo as variações (defasagens e atenuações) inerentes ao processo de propagação do mesmo. Já o modelo do filtro  $w[n]$  engloba seus coeficientes, os quais são otimizados pelo algoritmo adaptativo. Este último utiliza como referência o sinal de erro  $e[n]$  e o sinal  $x_{c^*}[n]$ , o qual é filtrado pelo modelo estimado do caminho secundário  $C^*[n]$ , obtido por meio do NLMS. Esta operação de filtragem é descrita pela Equação (2), na qual  $M_{C^*}$  é o número de coeficientes do filtro FIR que representa a estimativa do caminho secundário, e é definido pelo usuário. A sua escolha adequada tem associação direta com eficácia da estimação do caminho secundário.

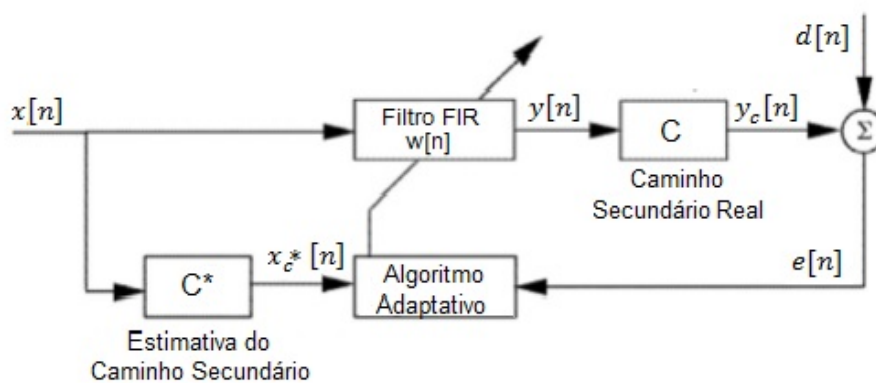


Fig. 4. Sistema de controle ativo F-XLMS.

Após a obtenção do sinal  $x_{c^*}[n]$ , este é utilizado como uma das referências para o cálculo da taxa de variação dos coeficientes do filtro ao longo do tempo, que pode ser definida como o gradiente do erro, representado por:

$$\Delta W_m[n] = \rho x_{c^*}[n]e[n] \quad (2)$$

na qual  $\Delta W_m$  é taxa de variação do  $m$ -ésimo coeficiente do filtro adaptativo F-XLMS.  $\Delta W_m$  é definida a partir do sinal filtrado  $x_{c^*}[n]$ , de uma constante  $\rho$  e do sinal de erro  $e[n]$ . Outro parâmetro de entrada a ser inserido pelo usuário é a taxa de aprendizagem  $\mu$ . Tal parâmetro define a magnitude de variação do coeficiente a cada passo de integração do método.

Esses parâmetros devem ser definidos tanto no filtro adaptativo para estimação do caminho secundário quanto no filtro  $W[n]$ . Os valores dos parâmetros  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $M$  e  $M_{C^*}$  variam de acordo com o ambiente e as características do ruído, onde  $M$  e  $M_{C^*}$  possuem o mesmo tamanho.

A influência do parâmetro  $\mu$  na variação do  $i$ -ésimo coeficiente do filtro, do algoritmo F-XLMS, pode ser representado conforme equação a seguir:

$$w_i[n + 1] = w_i[n] + \mu \cdot x_{c^*}[n] \cdot e[n] \quad (3)$$

onde  $w_i[n + 1]$  é a definição do valor futuro do coeficiente. O  $w_i[n + 1]$  é definido pelo valor atual do coeficiente  $w_i[n]$ , adicionado ao valor atual do sinal de entrada filtrado  $x_{c^*}[n]$ , que por sua vez é multiplicado pelo sinal erro  $e[n]$  e pelo taxa de aprendizagem  $\mu$ . O sinal de saída do filtro principal  $w[n]$ , denotado por  $y[n]$ , é definido por:

$$y[n] = w_i[n] * x[n] = \sum_{m=0}^{M-1} w_i[m]x[n - m] \quad (4)$$

Na qual  $M$  é o comprimento do filtro. O sinal  $y[n]$  por sua vez, será enviado para emissão ao meio. Porém, antes de ser emitido ele passa pelo caminho secundário, que também é modelado por um filtro, este representado pela letra  $C$ . O sinal de saída do caminho secundário é representado por  $y_c[n]$  e pode ser definido como:

$$y_c[n] = c[n] * y[n] = \sum_{m=0}^{M_{C^*}-1} c[m]y[n - m] \quad (5)$$

Após obtenção do parâmetro  $y_c[n]$ , este é somado ao ruído a ser atenuado  $d[n]$ , obtendo-se, portanto, o sinal de erro  $e[n]$ , conforme demonstrado na equação abaixo:

$$e[n] = d[n] + y_c[n] \quad (6)$$

Depois da obtenção do sinal de erro  $e[n]$ , este é usado como referência para uma nova análise e adaptação do filtro, em busca do filtro ótimo.

É importante ressaltar que a escolha de  $M$  depende da ordem do sistema associado ao caminho secundário que se quer estimar, portanto, depende do ambiente em que se deseja empregar controle ativo de ruído. Além disso, quanto maior taxa de aprendizagem  $\mu$ , maior é a velocidade de redução do ruído realizada pelo filtro adaptativo, contudo, menor é sua eficácia em regime permanente. Dessa forma, a escolha da taxa de aprendizagem adequada está diretamente relacionada ao comportamento do ruído, ou seja, se ele é um ruído de fundo perene ou com variações rápidas intermitentes.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Descrição do Ambiente

O ambiente escolhido para levantamento de dados e aplicação do método foi a Estação de Compressão de Campos Elíseos, localizada na cidade de Duque de Caxias no Estado do Rio de Janeiro. Ela é responsável por aumentar a capacidade de transporte de um sistema de gás natural (um Gasoduto), fornecendo a esse fluido energia suficiente para que possa ser transportado ao destino final.

O sistema principal da estação é equipado com quatro compressores acionados por turbinas, denominadas turbo máquinas. Ademais, existem na estação sistemas auxiliares responsáveis por garantir o seu funcionamento. O sistema de ar comprimido é composto por três compressores e é responsável pela captação do ar atmosférico e, após tratá-lo, de fornecê-lo na forma de ar comprimido para instrumentação local.

Outro sistema auxiliar é o de fornecimento de energia elétrica, composto por dois motores geradores que usam como fonte de força eletromotriz motores de combustão interna que, por sua vez, têm como combustível o próprio gás natural movimentado pela estação, garantindo sua autonomia.

## 3.2. Medições em Campo

### 3.2.1. Procedimento

As medições foram realizadas em horários nos quais se tem a maior demanda elétrica e de escoamento de gás natural da estação e, por consequência, os sistemas de compressão, ar comprimido e geração de energia elétrica são mais requisitados.

As gravações e medições dos níveis sonoros foram realizadas a uma altura de 1,60 m do solo e a uma distância de 1,00 m dos equipamentos. Essas medidas foram referenciadas na altura aproximada do operador, quando este está próximo ao equipamento.

Foram adquiridos dois tipos de dados, de forma simultânea: uma gravação do áudio na estação, a qual gerou um arquivo com extensão “.wav” para ser processado, e a medição do ruído, em dB SPL, ao qual o operador fica exposto naquele ambiente nas condições operacionais.

As anotações das medições em campo registraram os valores máximos de intensidade sonora (em dB SPL), o valor médio desta intensidade sonora (Lavg) ao qual o operador está submetido, as datas e os horários das medições.

Em cada ambiente foram geradas duas gravações, uma contendo apenas o ruído dos equipamentos em operação, para um melhor mapeamento do espectro de frequência dos equipamentos, e uma segunda gravação na qual foi adicionada a voz humana, através de uma pessoa recitando um texto padrão.

### 3.3.2. Equipamentos Utilizados

Foram utilizados uma máquina Fotográfica (Iphone 6®), um caderno de anotações, uma trena e um dosímetro de ruído Instrutherm® modelo DOS-500, com possibilidade de armazenamento de cinco eventos distintos, com registro de dados para verificação futura. As características do equipamento podem ser encontradas na página web <https://www.instrutherm.net.br/media/catalog/product/d/o/dos-600.pdf>.

As configurações utilizadas para medição estão representadas na Tabela 1. Para a gravação dos sinais de áudio foi utilizado programa específico conforme descrito na Tabela 2. O valor da taxa de amostragem é referenciado segundo o teorema da amostragem. Como o objetivo é o tratamento de sinais audíveis e a frequência máxima perceptíveis pelo ouvido humano é de 20 kHz, o dobro desta traria a taxa de 40 kHz. No entanto, para uma margem maior de análise, foi tomada a frequência de 24 kHz, o que implica em uma taxa de amostragem de 48 kHz.

Tabela 1. Configurações utilizadas no dosímetro de ruído para medição.

Parâmetro	Valor/Descrição
Nível de critério (Lc)	85 dB SPL
Nível limiar (Lt)	80 dB SPL
Taxa de troca (EA 5)	5 dB SPL
Tempo de resposta	Lento

Tabela 2. Programa de gravação.

Parâmetro	Valor/Descrição
Software	<i>Awesome Voice Recorder Pro</i> ® 3.3
Equipamento utilizado	Smartphone modelo Iphone 6®
Extensão dos arquivos gerados	'.wav'
Taxa de amostragem	48000 Hz
Bit rate	320 kbps

### 3.3. Dados Obtidos

Os parâmetros de configuração e os procedimentos de medição foram adaptados da norma regulamentadora NR15-TRT [14] e da Norma de Higiene Ocupacional NHO-01 NBR, [15]. Os critérios de medição foram adequados às especificações das normas vigentes e das orientações descritas no manual do fabricante [16].

A NR15-TRT estabelece que o ruído deve ser avaliado em decibel (dB SPL) com equipamento adequado, que as medidas devem ser efetuadas próximas ao ouvido do operador e com o equipamento configurado para circuito de resposta ou ponderação de tempo lenta (*Slow*), que fornece um intervalo maior para registro dos dados aferidos pelo sensor do equipamento.

A Norma de Higiene Ocupacional 01 [15] define os parâmetros de configuração do equipamento, tais como nível médio ( $L_{avg}$ ), nível de critério ou critério de referência, nível limiar ou nível limiar de integração e taxa de troca ou incremento de duplicação de dose.

Os pontos de medição foram definidos com referência em deslocamentos usuais do operador. Em cada um dos pontos do ambiente foram tomadas quatro medições.

#### 3.3.1. Área dos compressores de ar

Em condições normais de operação da Estação existem três compressores de ar, que operam alternadamente. No entanto, entram em operação aleatoriamente, comandados pelo controlador lógico programável (CLP) local, de modo a atenderem a demanda de ar comprimido da estação. Assim, as medições foram tomadas de modo que garantissem a abrangência de todos os equipamentos em operação.

Na Fig. 5, as indicações em vermelho apresentam os locais onde foram realizadas as medições. Na Tabela 3 constam os dados aferidos em campo. Nesta os valores dos níveis máximos de ruído apresentam-se

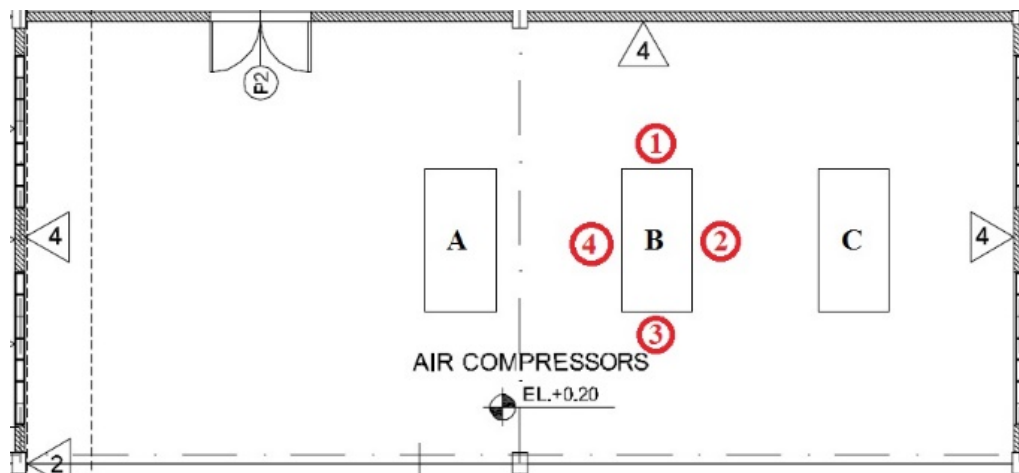


Fig. 5. Área dos compressores de ar.

Tabela 3. Dados medidos na área de compressores de ar.

Parâmetro	Valor
Tempo de exposição à fonte	4 minutos
Nível máximo de ruído - Área 1	90,50 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 2	91,30 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 3	90,00 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 4	91,10 dB SPL
Nível Médio de ruído ( $L_{avg}$ )	88,09 dB SPL

significativamente elevados. Por consequência, o nível médio ( $L_{avg}$ ) também se mostra elevado e acima do valor de referência de 85 dB SPL, estabelecido pela norma NR-15 [14]. Portanto, a Tabela 3 explicita de forma clara a poluição sonora no ambiente ao qual o operador está sujeito.

### 3.3.2. Área de geradores

As medições foram executadas nas localizações apresentadas em vermelho na Fig. 6, pois no momento da medição, o gerador "B" estava operando e o "A" estava como reserva.

A Tabela 4 apresenta os valores aferidos em campo. Nota-se que estes ainda se encontram acima da referência de 85 dB SPL, estipulada por norma, caracterizando outro cenário crítico vivenciado pelos operadores da estação de compressão.

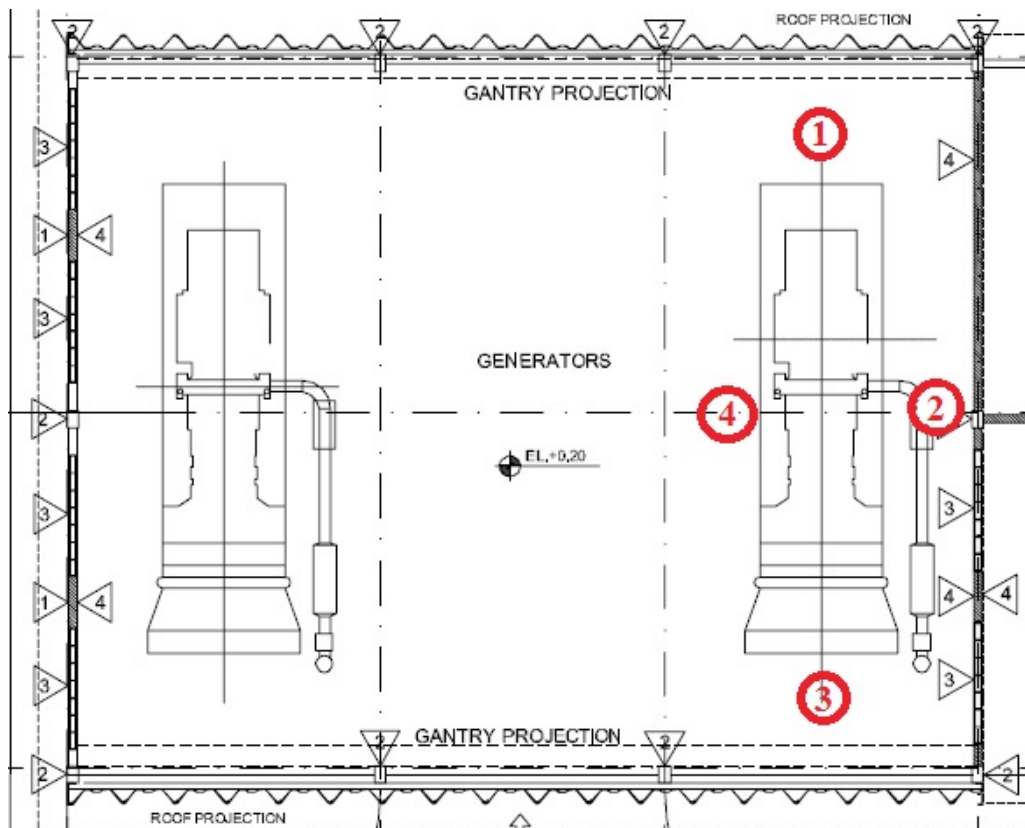


Fig. 6. Área de geradores.

Tabela 4. Dados aferidos na área de geradores.

Parâmetro	Valor
Tempo de exposição à fonte	3 minutos
Nível máximo de ruído - Área 1	87,30 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 2	88,70 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 3	88,00 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 4	87,00 dB SPL
Nível médio de ruído ( $L_{avg}$ )	86,31 dB SPL



### 3.3.3. Área das turbinas

A demanda operacional na hora da medição requeria a operação de apenas a turbina "C". Portanto, a medição foi tomada na periferia desta turbo máquina, como ilustrado na Fig. 7. Os locais de medição estão indicados em vermelho. Na Tabela 5, constam os dados aferidos em campo.

A Tabela 5 retrata o cenário mais ruidoso dentre os três analisados. Nota-se que os valores máximos aquisitados estão em torno de 100 dB SPL, levando o nível médio ( $L_{avg}$ ) à 97,17dB SPL, ou seja, 17,17dB SPL acima do valor de referência.

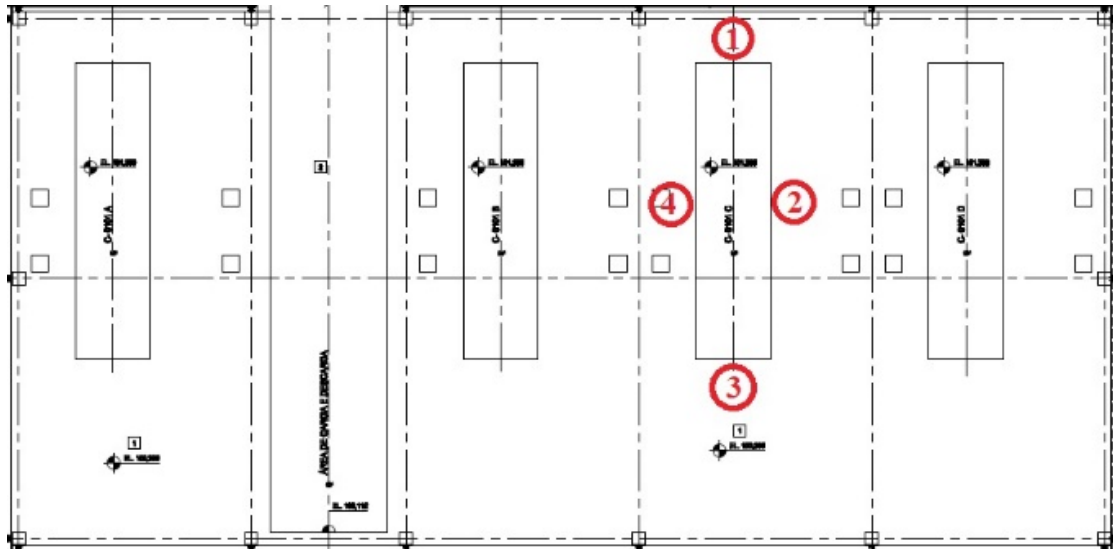


Fig. 7. Área das turbinas.

Tabela 5. Dados Aferidos na área das turbinas.

Parâmetro	Valor
Tempo de exposição à fonte	6 minutos
Nível máximo de ruído - Área 1	101,20 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 2	99,50 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 3	100,50 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 4	101,00 dB SPL
Nível médio de ruído ( $L_{avg}$ )	97,17 dB SPL

### 3.4. Sistema implementado

Definidos os parâmetros de taxa de aprendizagem  $\mu$  e do comprimento do filtro  $M$ , o primeiro passo do algoritmo é a obtenção da estimativa do caminho secundário. O sistema é programado para gerar um ruído aleatório, de aproximadamente 3,75 segundos e o emitir. O sensor de erro (microfone) capta esse sinal e, utilizando o algoritmo NLMS, estima a função de transferência do caminho secundário.

A Fig. 8 apresenta o resultado da estimativa de um caminho secundário aleatório, simulado pelo programa de cálculo científico *Matlab*®. A taxa de aprendizagem  $\mu$  e do comprimento do filtro  $M$ , do algoritmo NLMS, foram definidos como:  $\mu=0.3$  e  $M=550$ .

O resultado apresentado na Fig. 8, traz um comparativo entre a resposta do caminho secundário real (em azul), em relação ao sinal de 3,75 segundos emitido. Pode-se observar também o sinal de erro (em vermelho), que explicita a diferença entre os dois sinais citados anteriormente. Nota-se a redução do sinal de erro, conforme adaptação do filtro NLMS, estabilizando em torno de 0,8 s. Portanto, esse é o tempo necessário ao algoritmo para estimar o caminho secundário.

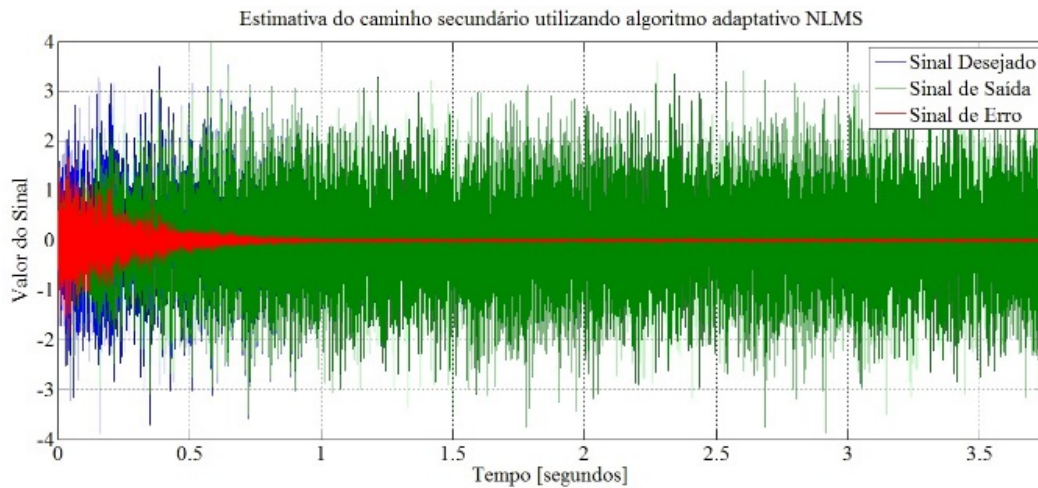


Fig. 8. Estimativa do caminho secundário.

O caminho primário representado na Fig. 3 é aproximado através de um filtro linear. Esse modelo é usado apenas na simulação do sistema, de maneira a aproximar o modelo ao sistema real. Com as estimativas realizadas, segue-se à implementação do filtro F-XLMS.

Na topologia apresentada na Fig. 4, o sinal gravado em campo é filtrado pela estimativa do caminho secundário. O sinal resultante e o sinal de erro são as referências para as adaptações iterativas do filtro, que são regidas pelo algoritmo F-XLMS. Tendo atravessado o filtro, o sinal passa pelo caminho secundário real e o sinal antirruído é emitido.

O antirruído é emitido pela fonte secundária e é superposto ao sinal o qual se deseja atenuar. Porém, o ruído ao qual o antirruído é superposto, não é o original captado na fonte mas, sim, um sinal que apresenta alterações inerentes ao percurso de propagação [12]. Portanto, no sistema simulado o caminho primário também é modelado por um filtro linear.

Ocorrida a superposição, o sensor de erro (microfone) capta o sinal resultante e realimenta o algoritmo adaptativo, que otimiza os coeficientes do filtro, de modo a minimizar o sinal de erro.

O sistema simulado traz como particularidade a implementação de um novo bloco na topologia de controle, que é o modelo de estimativa do caminho primário, conforme destacado em vermelho na Fig. 9.

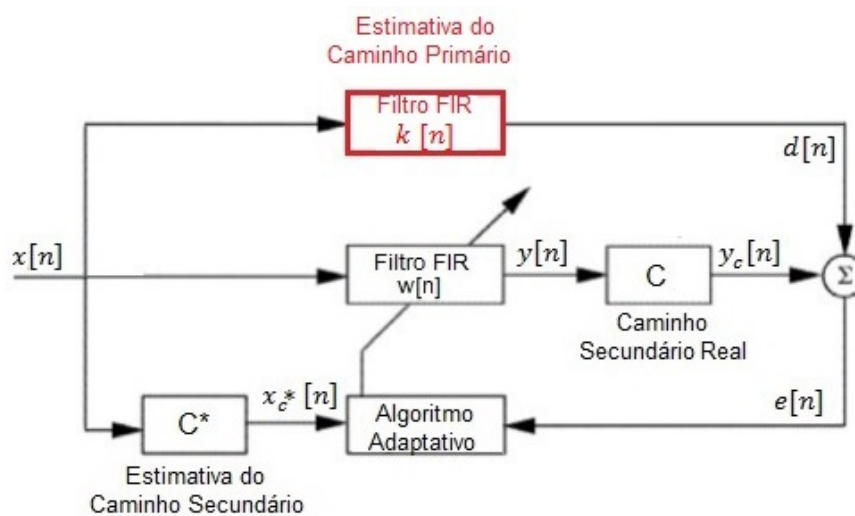


Fig. 9. Sistema implementado para simulação.

A Tabela 5 retrata o cenário mais ruidoso dentre os três analisados. Nota-se que os valores máximos aquisitados estão em torno de 100 dB SPL, levando o nível médio (Lavg) à 97,17dB SPL, ou seja, 17,17dB SPL acima do valor de referência.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Área dos compressores de ar ( $M=350$ e $\mu=0.0006$ )

Nas Figuras 10 e 11 estão apresentadas em valores absolutos a relação entre o sinal original (ruído), o antirruído e o ruído residual (erro) na área dos compressores de ar. Observa-se que o ruído resultante apresenta uma atenuação relevante em relação ao ruído original. A capacidade de adaptação do algoritmo é nitidamente observada nos momentos de maior variação do sinal, a qual ocorre entre aproximadamente 2 e 5 segundos. É notório um aumento imediato do erro quando das variações mais abruptas do sinal, porém o algoritmo responde tendendo a minimizá-lo novamente.

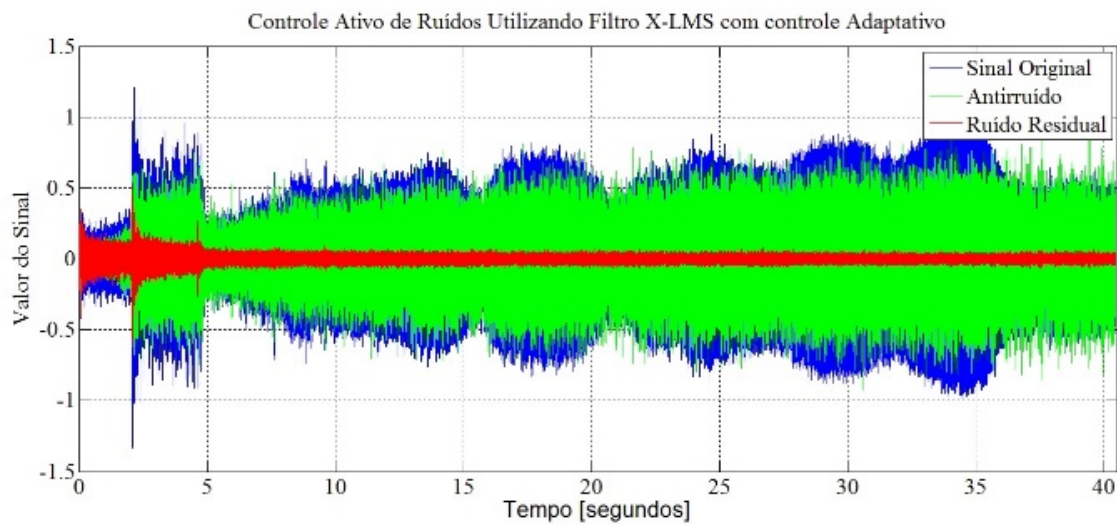


Fig. 10. Área dos compressores de ar – Relação sinal original x antirruído x sinal residual.

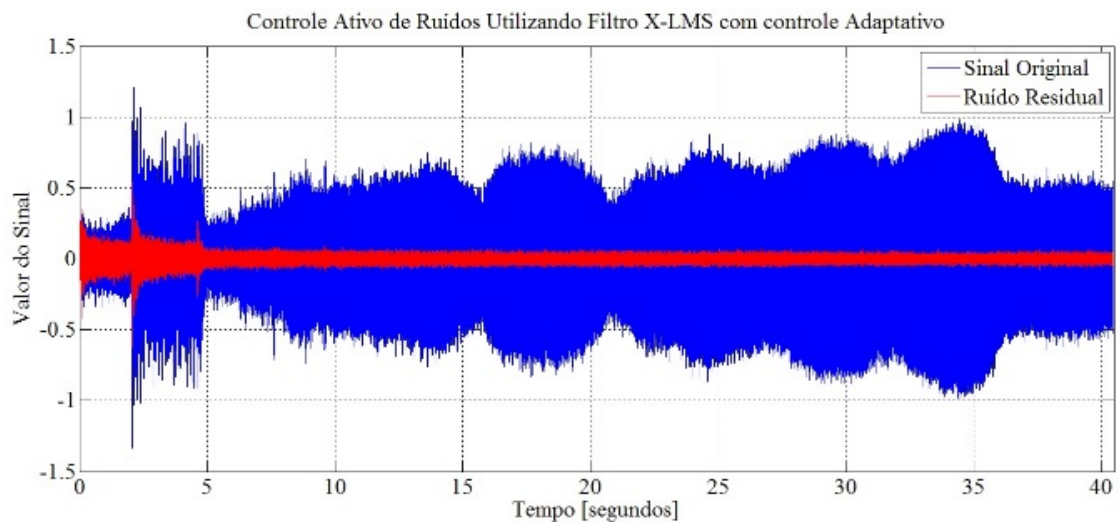


Fig. 11. Área dos compressores de ar – Relação sinal original x sinal residual (erro).

A Fig. 12 apresenta os espectrogramas dos sinais (original e atenuado) da área de compressores de ar ao longo do tempo. É perceptível a redução da concentração de energia do espectro no sinal atenuado, em comparação ao sinal original. Tal característica é observada pela menor concentração da tonalidade vermelha e uma maior concentração da tonalidade verde no espectro do sinal atenuado. Observa-se também que a atenuação do sinal não é concentrada numa faixa contínua ou exclusiva de frequência, esta acontece em todo espectro, característica inerente à adaptabilidade do sistema. É evidenciado o momento de variação do sinal, explicitando os momentos em que o algoritmo é mais exigido, na tentativa de estabilização do sinal de erro.

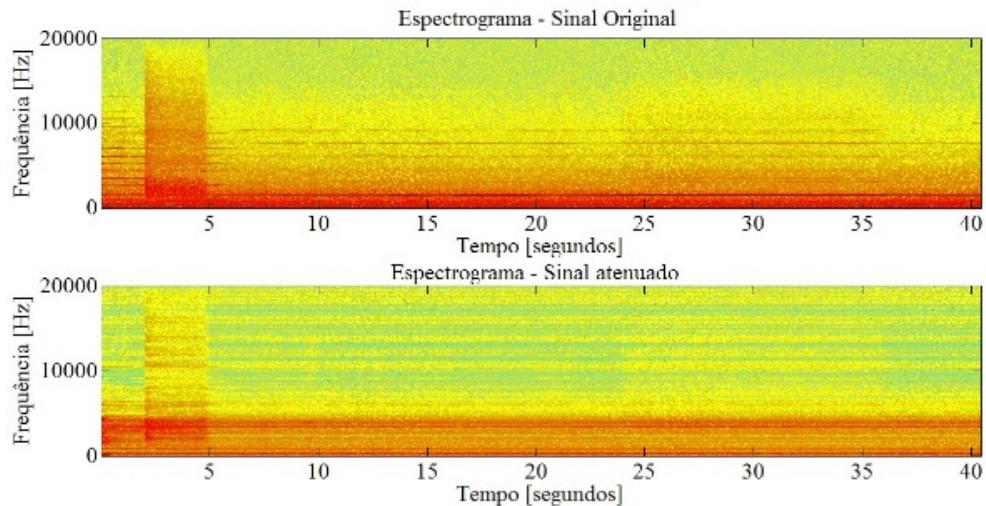


Fig. 12. Área dos compressores de ar – Espectrograma.

Na Fig. 13, tem-se uma percepção mais adequada quanto ao campo sonoro atenuado da área de compressores de ar, dado que sua representação é feita em dB. Nota-se que na faixa das médias e baixas frequências (entre 1,0 e 3,5 kHz) o sistema apresentou o melhor resultado, chegando a atenuações de aproximadamente 30 dB. Em frequências superiores também são observados alguns pontos distintos de atenuação. Entretanto, a concentração do espectro do sinal original encontra-se entre 0 e 5kHz, portanto, essa é a faixa de maior interesse.

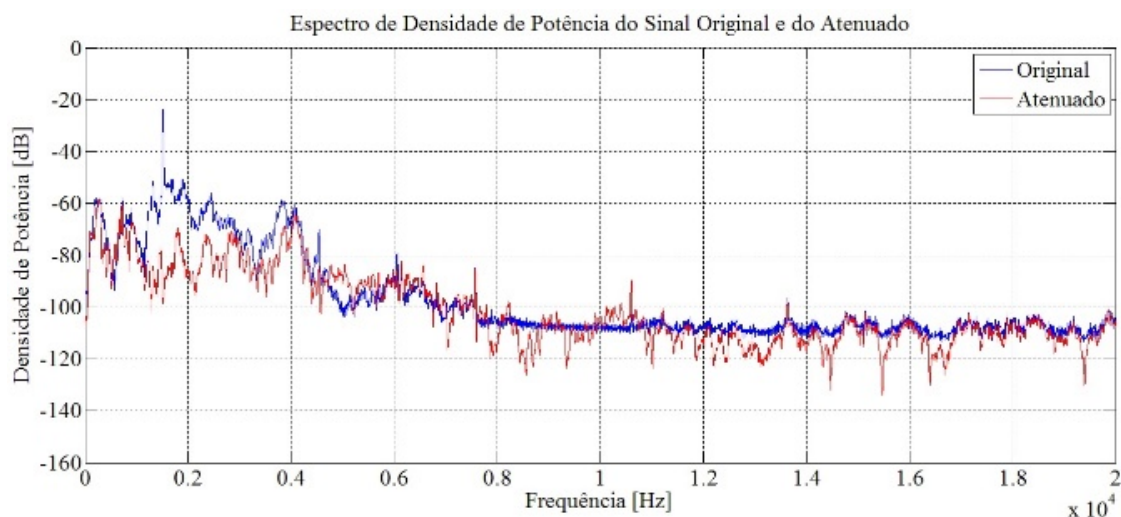


Fig. 13. Área dos compressores de ar – Espectro de densidade de potências dos sinais.

#### 4.2. Área de geradores ( $M=1200$ e $\mu=0.0009$ )

Nas Figuras 14 e 15 são apresentadas em valores absolutos a relação entre o sinal original (ruído), o antirruído e o ruído residual (erro) da área de geradores. Nota-se que o ruído resultante apresenta uma atenuação relevante em relação ao ruído original, tal como no ambiente descrito anteriormente. A convergência do ruído residual (erro) ocorre num curto espaço de tempo, mantendo-se estável durante o restante do período.

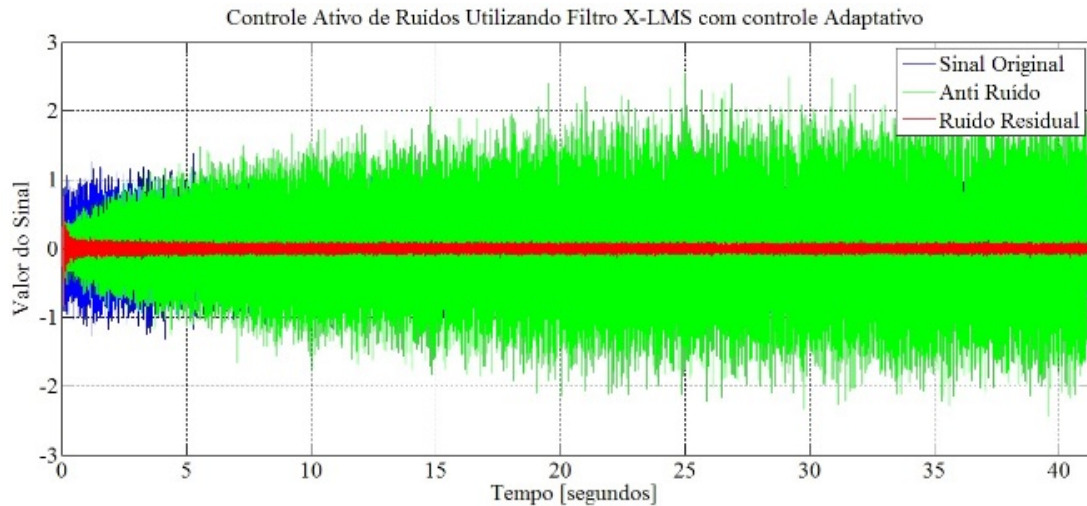


Fig. 14. Área de geradores – Relação sinal original x antirruído x sinal residual (erro).

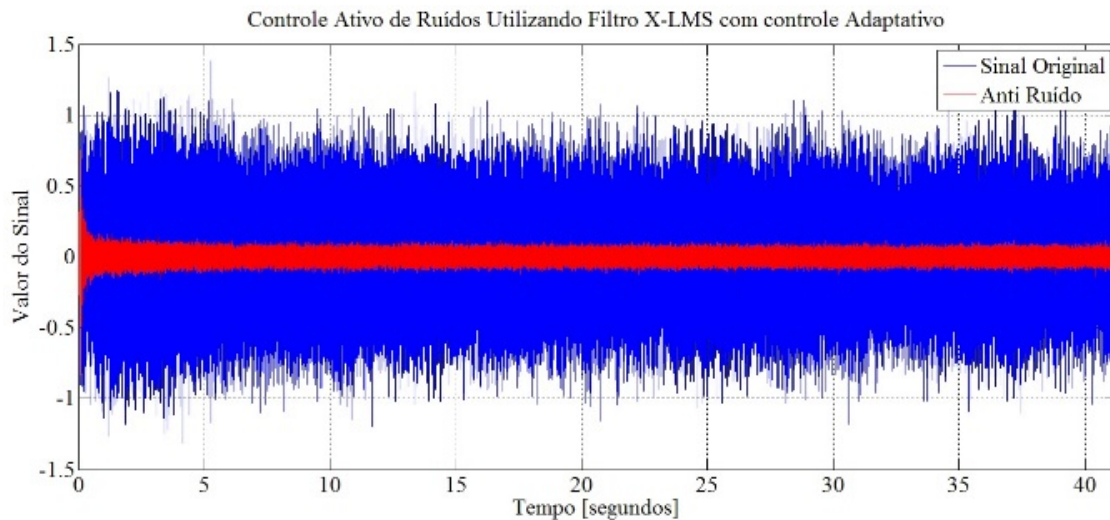


Fig. 15. Área dos compressores de ar – Espectro de densidade de potências dos sinais.

Na Fig. 16 tem-se o comparativo entre os espectros do sinal original e do sinal atenuado na área de geradores. O espectro do sinal atenuado apresenta forte redução nas faixas onde ocorrem as maiores concentrações de energia do sinal original. Portanto, o algoritmo manteve a sua eficácia nas faixas de maior concentração do espectro de 0 à 5 kHz, porém mantendo sua ação em faixas superiores de frequência.

A Fig. 17 apresenta a atenuação do campo sonoro, comparando o sinal original e o atenuado. Observa-se que o método obteve resultados mais significativos entre 1,5 e 4 kHz, porém na faixa de 2 kHz obteve seu melhor ponto de desempenho, chegando a 50 dB de atenuação. Entretanto, em alguns pontos do espectro foram observadas amplificações do sinal. Essas amplificações ocorreram em pontos de menor densidade de potência no espectro, portanto, não representam problemas quanto a implementação prática.

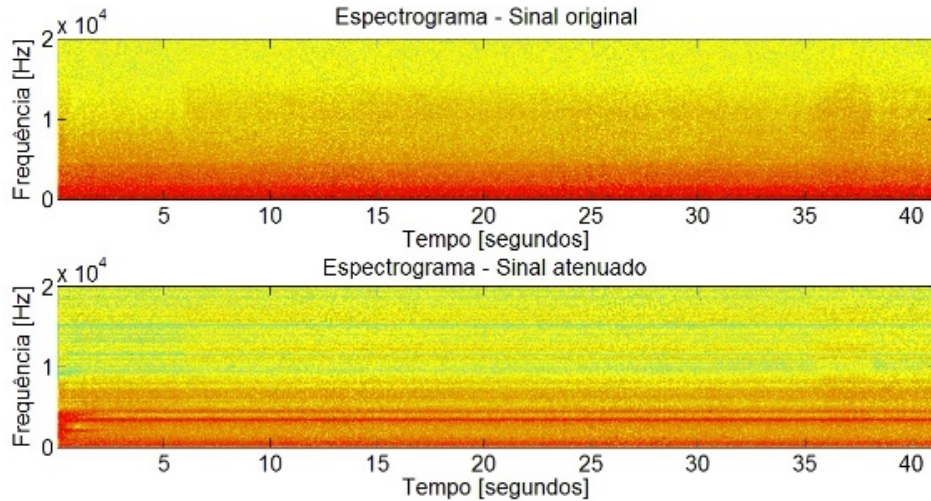


Fig. 16. Área de geradores – Espectrograma.

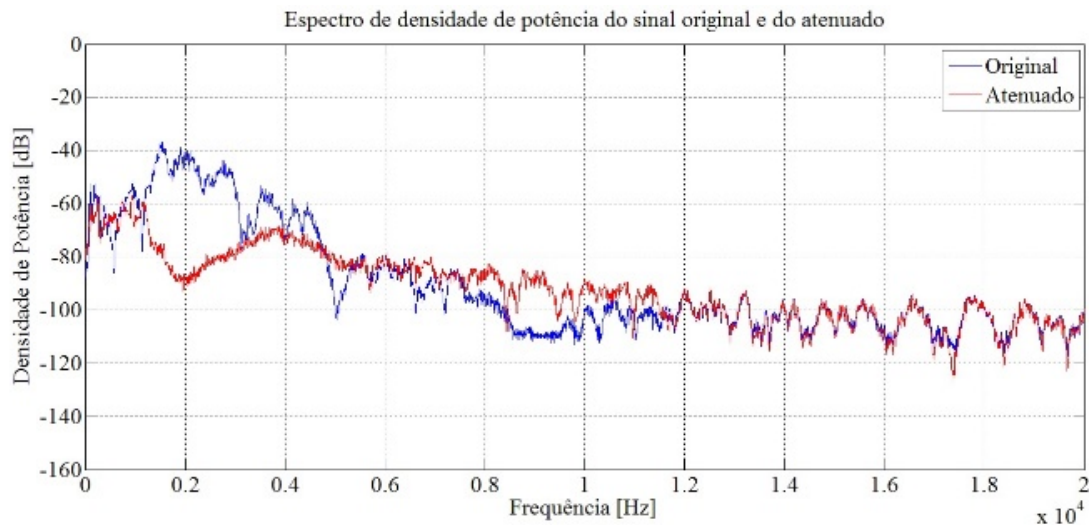


Fig. 17. Área de geradores – Espectro de densidade de potências dos sinais.

#### 4.3. Área das turbinas ( $M=850$ e $\mu=0.00012$ )

Nas Figuras 18 e 19 são apresentadas em valores absolutos a relação entre o sinal original (ruído), o antirruído e o ruído residual (erro) na área das turbinas. O sistema de controle ativo mantém uma eficácia satisfatória, porém é nítido que a relação entre o sinal original e o ruído residual é maior que nos ambientes anteriores. Esse fato é justificado pela característica de maior variação do sinal da turbina. Apesar do sinal do erro ser mantido dentro de uma faixa de controle, são observadas variações maiores em seu valor quando comparado aos ambientes anteriormente tratados.

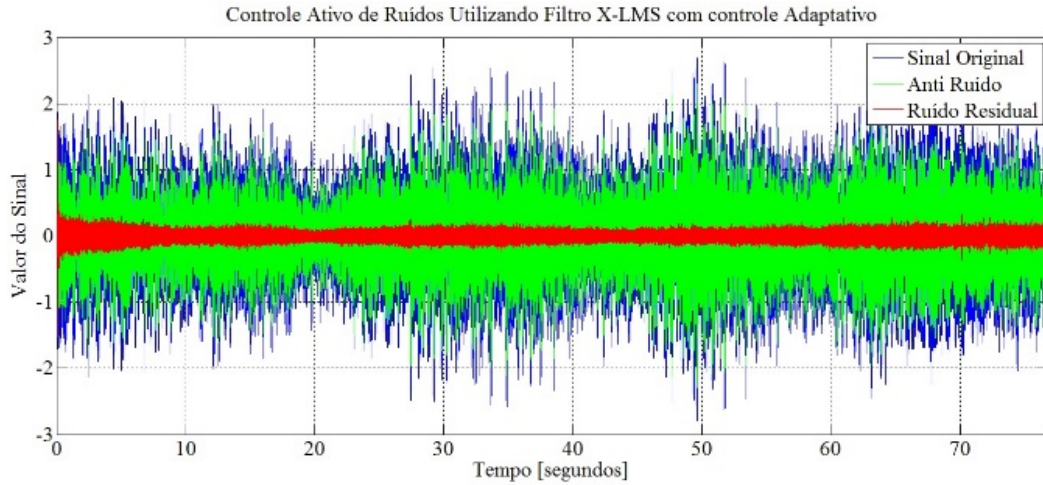


Fig. 18. Área das turbinas – Relação sinal original x antirruído x sinal residual (erro).

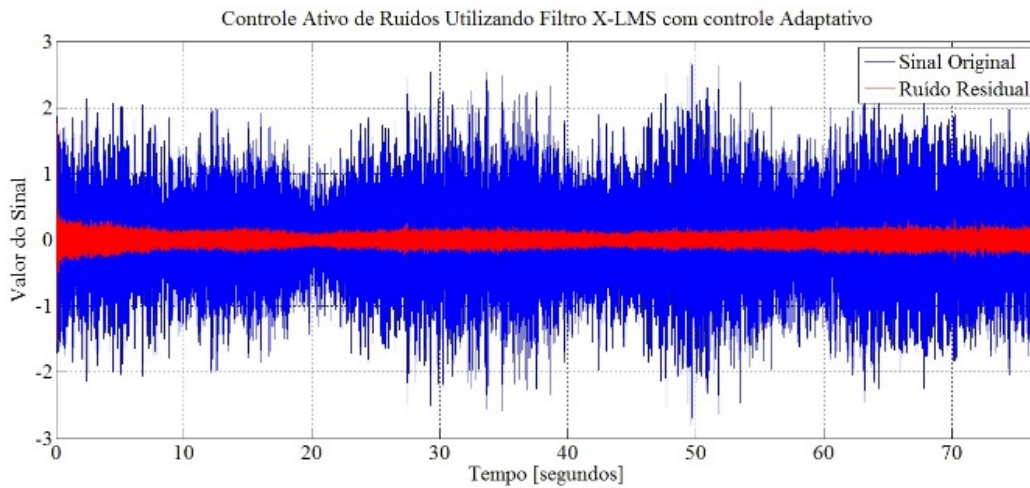


Fig. 19. Área das turbinas – Relação sinal original x sinal residual (Erro).

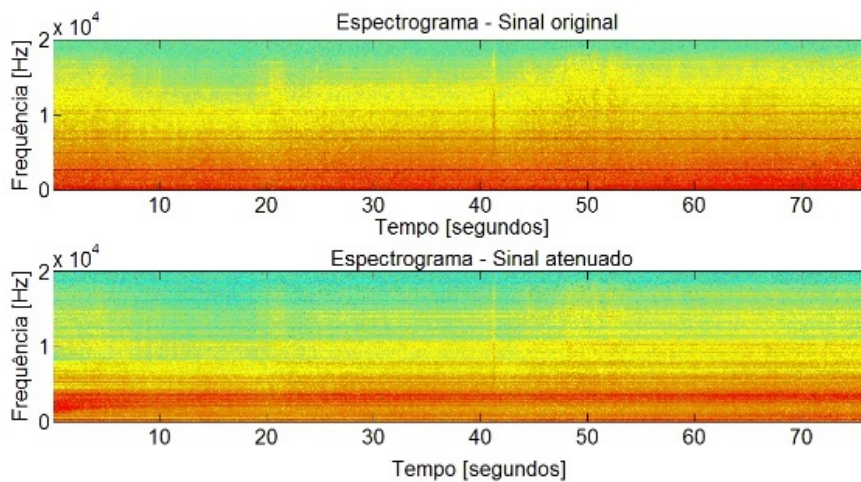


Fig. 20. Área das turbinas – Espectrograma.

Na Fig. 20, tem-se o comparativo temporal dos os espectros do sinal original e do sinal atenuado na área das turbinas. Mais uma vez observam-se faixas de frequência distintas com uma notória redução da

concentração de energia. Porém percebe-se uma ação maior do algoritmo em altas frequências. Essa maior atuação é justificada pelo fato de o espectro da área das turbinas apresentar uma concentração maior de energia em faixas de alta frequência, quando comparado aos outros ambientes.

A Fig. 21 apresenta uma comparação entre o espectro dos sinais com valores em dB, evidenciando o campo sonoro atenuado na área das turbinas. Nesse comparativo observa-se que o sinal atenuado apresentou uma redução máxima de aproximadamente 30dB entre 2 e 4kHz e, apesar do comportamento satisfatório, sua influência foi menor nas faixas de média e baixa frequências, quando comparado aos ambientes anteriores. Porém percebe-se uma atuação maior do algoritmo quando analisadas as frequências acima de 8kHz, apresentado uma maior quantidade de pontos de atenuação.

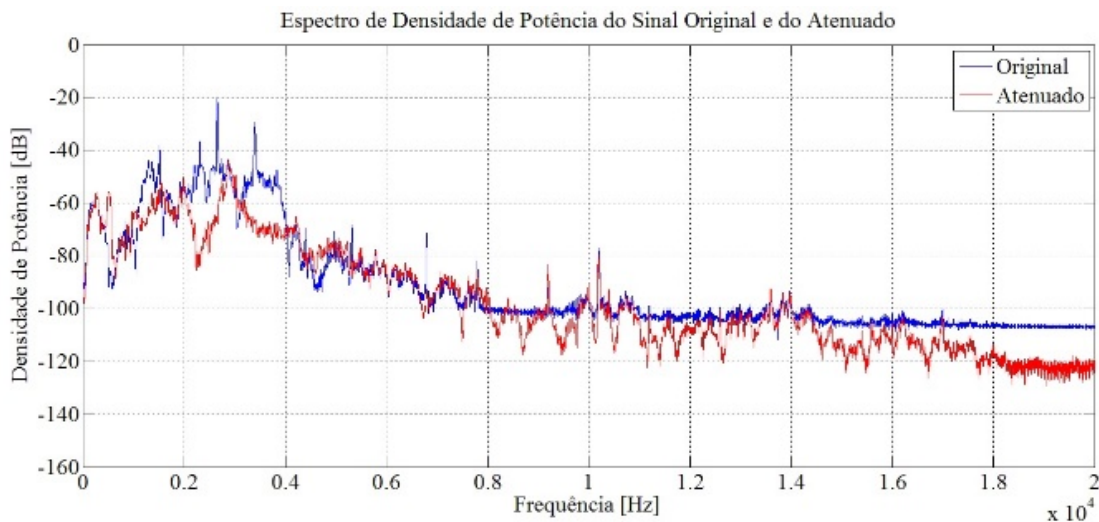


Fig. 21. Área das turbinas – Espectrograma.

#### 4.4. Comutação entre ambientes ( $M=800$ e $\mu=0.00009$ )

Neste cenário, foi efetuada a tentativa de simular uma condição extrema, a qual seria a mudança abrupta de ambientes. Tal simulação seria uma tentativa de adequar os valores da taxa de aprendizagem  $\mu$  e o comprimento do filtro  $M$ , de maneira que o algoritmo atendesse aos três cenários em análise.

Foi feita uma montagem através do software Audacity®, no qual foram inseridos sequencialmente trechos com duração de 15 segundos originários de cada um dos cenários, ocorrendo comutações instantâneas entre os mesmos, sendo o arquivo resultante submetido ao algoritmo de controle ativo. Os parâmetros utilizados foram:  $M = 800$  e  $\mu = 0.00009$  e as comutações entre os ambientes ocorrem exatamente em 15 e 30 segundos.

As Figuras 22 e 23 apresentam a relação entre o sinal original, o antirruído e o ruído residual, da comutação entre ambientes. A resposta do sistema de controle ativo, após a estabilização do controle, mostra-se satisfatória, no que diz respeito ao valor absoluto de atenuação. Porém, é importante destacar a necessidade de um tempo maior para convergência do sinal de erro no momento inicial do sistema, algo em torno de 5 segundos, tempo esse longo quando comparado aos ambientes em separado. Esse tempo maior é justificado pela necessidade de uma taxa de aprendizagem menor  $\mu$ , quando comparado aos ambientes em separado. Tal necessidade se dá pelas características de maior variação do sinal, principalmente nos pontos de transição do sistema (em 15 e 30 segundos exatamente). É importante observar também que apesar da necessidade de um tempo maior de convergência nos momentos iniciais da aplicação, nos momentos de transição a influência da variação de ambientes no sinal de erro foi muito menor.

Na Fig. 24, tem-se o comparativo ao longo do tempo entre os espectrogramas do sinal original e do sinal atenuado na área de comutação entre os ambientes. É evidenciado nos primeiros 5 segundos da aplicação a baixa eficiência do sistema na redução da densidade do espectro, conforme já justificado na figura anterior.



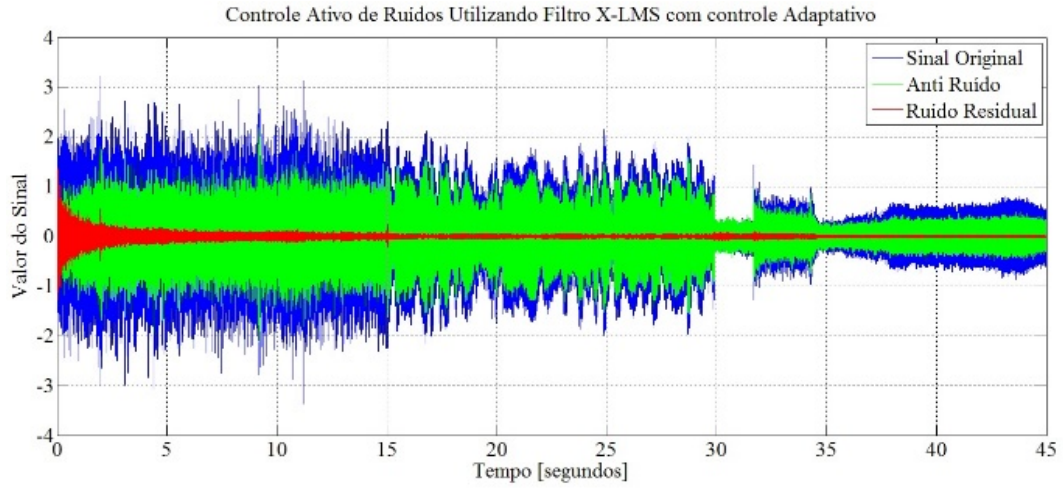


Fig. 22. Comutação entre ambientes – Relação sinal original x antirruído x sinal residual (erro).

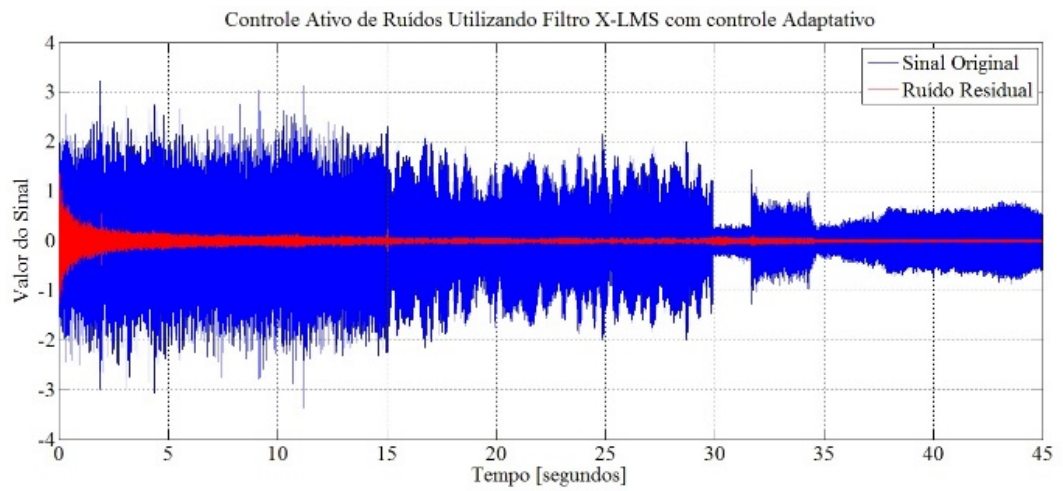


Fig. 23. Comutação entre ambientes – Relação sinal original x sinal residual (erro).

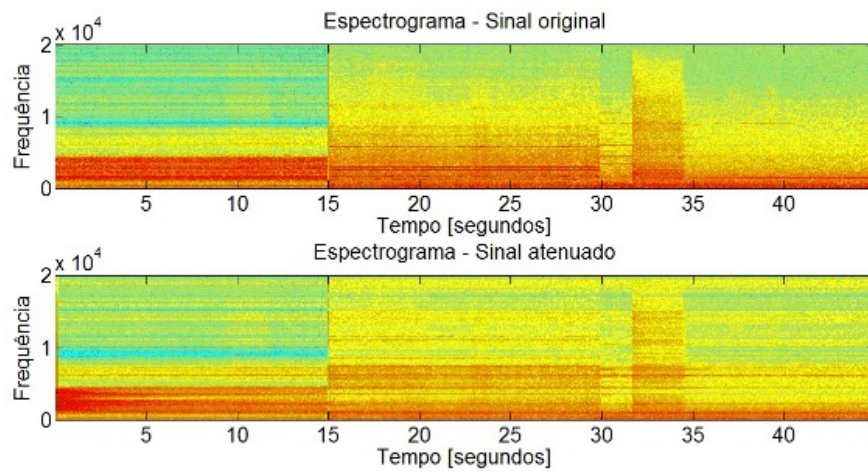


Fig. 24. Comutação entre ambientes – Espectrograma.

Porém, a partir da estabilização do controle, o sistema demonstra mais uma vez seu potencial de controle agindo sobre o espectro do sinal, nos pontos de maior concentração de frequência.

Na Fig. 25, é apresentada a comparação entre o espectro dos sinais com valores em dB, evidenciando o campo sonoro atenuado na área de comutação entre ambientes. Neste aspecto, é evidenciada a atuação do sistema numa faixa maior de frequência do que nas áreas anteriores analisadas. O sistema consegue uma atenuação máxima de 50 dB, no entanto, mantém esse fator de atenuação alto entre a faixa de 1,5 e 4 kHz, ou seja, numa faixa relativamente extensa de frequências.

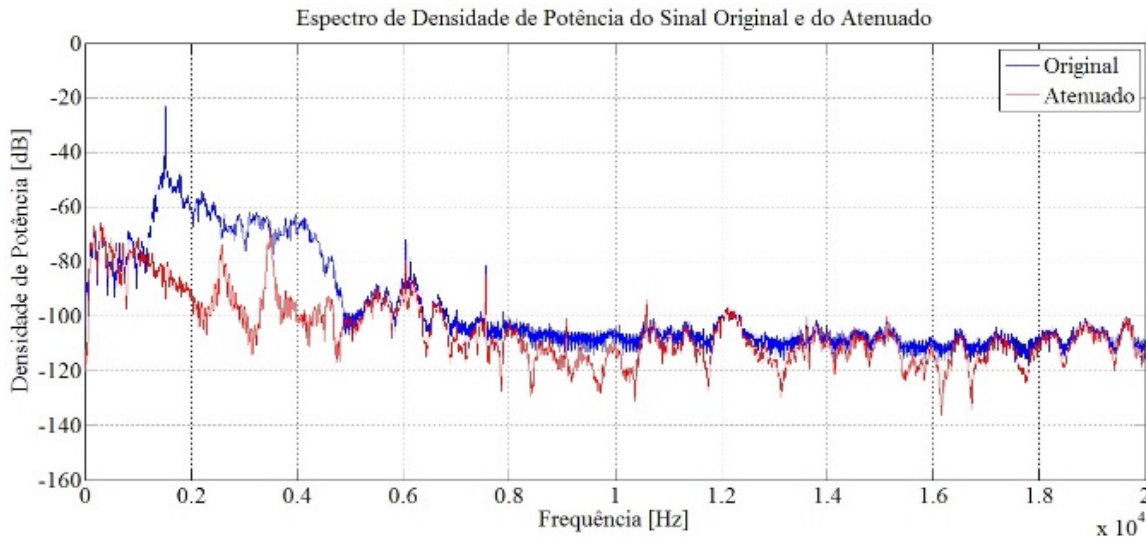


Fig. 25. Comutação entre ambientes - Espectro de densidade de potências dos sinais.

Apesar da simplicidade do sistema, ou seja, apenas com um sensor de erro e uma fonte secundária, é notória a eficiência do método de controle, buscando a convergência do sinal de erro, até que o mesmo atinja a condição determinada como ótima pelo algoritmo.

É importante destacar que nos três cenários, quando tratados separadamente, foram obtidos resultados satisfatórios tanto nos valores atenuados quanto no tempo de convergência do sinal de controle, levando o erro para próximo de zero. Porém, para tal, cada cenário demandou parâmetros diferentes de entrada para um resultado otimizado.

Quando implementado o sistema de controle no cenário extremo, ou seja, na comutação entre os ambientes, o sistema apresentou um resultado satisfatório quanto ao valor final do ruído residual. Porém, ocorreu um incremento considerável no tempo para convergência do mesmo, algo em torno de 5 segundos, reforçando a tese de que cada ambiente demanda um estudo e tratamento específico.

Considerando este tempo de convergência, seria necessário um estudo mais aprofundado para estimativa de quanto tempo o operador passaria por esta situação para, numa contabilização diária, verificar se o tempo de exposição extrema, durante esta convergência, estaria adequado às normas de tempo máximo de exposição ao ruído.

Quando analisada a variação do espectro de frequências ao longo do tempo, nota-se a atenuação nas faixas onde existe maior densidade espectral de sinal, mostrando uma redução da tonalidade vermelha ao longo do tempo no espectro.

Outro destaque a ser mencionado são os espectros de densidade de potência, que apresentam atenuação na faixa de 50dB em determinadas faixas de frequência. É perceptível que a atenuação do sistema se concentra onde há maior densidade de potência do sinal, indicando uma maior influência do método. Ainda no espectro de densidade de potência, no ambiente da área de geradores, é perceptível que em algumas faixas de frequências ocorre uma amplificação do sinal, contrário ao comportamento desejado, porém como ocorrem em faixas de frequências onde a densidade é muito reduzida, a influência torna-se desprezível no

resultado final. Tal fenômeno pode ocorrer tanto pelo comportamento do algoritmo, quanto por características no ambiente de aplicação, causando superposição de sinais de mesma fase.

É importante destacar que em todos os cenários analisados, os resultados obtidos mostram uma atenuação de todo o sinal tratado, ou seja, a aplicação direta do sistema de controle ativo no sinal composto pelo ruído e a voz humana não foi capaz de fazer a distinção dos dois, atenuando além do ruído, também o sinal de voz.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nas simulações do sistema de controle ativo de ruído proposto retratam o grande potencial da ferramenta utilizada, o algoritmo F-XLMS, para emprego em ambientes industriais. No entanto, apesar de ter se mostrado plausível nos cenários analisados em ambiente computacional, é evidente que o sistema ainda necessita de melhorias para implementação num cenário real. Como exemplo, cita-se a expansão do algoritmo para utilização de mais sensores de monitoramento e fontes secundárias, que tende a melhorar a eficácia do método.

A opção do controle ativo para implementação nos cenários analisados veio da necessidade de comunicação entre os operadores locais da estação de compressão. No entanto, foi evidenciado durante as simulações que a aplicação direta do método aos sinais captados, da voz humana, juntamente com o ruído a ser atenuado, não foi eficaz na atenuação apenas do ruído.

O fato de a voz humana ter seu espectro de frequência concentrado na mesma faixa dos ruídos os quais deseja-se atenuar, fez com que o algoritmo não fosse capaz de atenuar apenas os ruídos. Foram atenuadas todas as frequências presentes no sinal, inclusive da voz humana. Logo, faz-se necessário o estudo de métodos que possibilitem a separação da voz humana do sinal a ser atenuado. Uma sugestão seria a aplicação de um algoritmo de separação de fontes antes da execução controle ativo, porém tornaria o sistema mais complexo. Outra solução mais simples seria minimizar a potência do sinal da voz que chega aos sensores do sistema, tornando sua influência mínima no sistema de controle ativo.

Vale ressaltar que o sistema proposto não demanda barreiras físicas para o isolamento do usuário, como no controle passivo. Portanto, elimina a necessidade de utilização do protetor auricular do tipo concha, aliviando o operador deste equipamento incômodo. Com a ferramenta de controle ativo e o avanço no desenvolvimento de circuitos integrados, a implementação do sistema deve ser direcionada para fones de ouvido de tamanhos reduzidos, melhorando a ergonomia do usuário.

Já é um fato conhecido na literatura, porém foi evidenciado nas simulações que a variação dos parâmetros  $M$  e  $\mu$  ocorre de acordo com as características do ruído e do ambiente, sendo esses parâmetros inseridos manualmente. Métodos de análise utilizando sistemas inteligentes (como redes neurais, por exemplo) podem ser avaliados em trabalhos futuros, de modo que o sistema tenha a auto adequação ao ambiente, trazendo avanços ainda mais significativos, garantindo-se o bem estar e a segurança operacional dos operadores.

## REFERÊNCIAS

- [1] Sathler, C.S.F., *Controle Ativo de Ruído*, Universidade Federal do Paraná (2009)
- [2] Saúde, M.d., "Perda Auditiva Introduzida por Ruído (PAIR) - Saúde do Trabalhador Protocolos de Complexidade Diferenciada," Brasília (2006)
- [3] Bistafa, S.R., *Acústica aplicada ao controle do ruído*, São Paulo: Blucher (2018)
- [4] Snyder, S.D., Hansen, C.H., "The effect of transfer function estimation errors on the filtered-x LMS algorithm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, **42**(4), 950-953 (1994)
- [5] Elliott, S.J., Nelson, P.A., "Active noise control," *IEEE signal processing magazine*, **10**(4), 12-35 (1993)
- [6] Lueg, P., "Process of silencing sound oscillations", U.S. Patent 2,043,416 (1936)

- [7] Bies, D.A., Hansen, C.H., *Engineering Noise Control: Theory and Practice*, New Fetter Lane: Spon Press (2003)
- [8] Almeida, N.U., *O controle do ruído ambiental em empresas da Cidade Industrial de Curitiba*, Curitiba: Universidade Federal do Paraná (2008)
- [9] Simon, H., Barry, V.V., *Sinais e Sistemas*, Porto Alegre: Bookman (2001)
- [10] Haykin, S., *Neural networks: a comprehensive foundation*, Upper Saddle River: Prentice Hall PTR (1994)
- [11] Simpson, M.T., Hansen, C.H., "Use of genetic algorithms to optimize vibration actuator placement for active control of harmonic interior noise in a cylinder with floor structure," *Noise Control Engineering Journal*, **44**(4), 169-184 (1996)
- [12] Kuo, S.M., Morgan, D.R., "Active noise control: a tutorial review," *Proceedings of the IEEE*, **87**(6), 943-973 (1999)
- [13] Mathworks, "<https://www.mathworks.com/help/audio/examples/active-noise-control-using-a-filtered-x-lms-fir-adaptive-filter.html>," Mathworks, 24 Fevereiro 2016. [Online].
- [14] Brasil, "Normas regulamentadoras: NR-15-atividades e operações insalubres," Diário Oficial da União, (1978)
- [15] NBR, "10.152: Níveis de Ruído para Conforto Acústico," ABNT, Rio de Janeiro (1987)
- [16] Instrutherm, "Manual de instruções, Dosímetro pessoal de ruído com RS-232 e datalogger modelo DOS-500," Instrutherm \_ Instrumentos de Medição Ltda (2016)
- [17] Bies, D.H., Hansen, C.H., Campbell, R.H., "Engineering Noise Control," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1279 (1996)

## ACTIVE NOISE CONTROL APPLIED TO A GAS COMPRESSION STATION

**Abstract** – Based on the concept of active noise control, which uses the destructive superposition of signals to cancel unwanted noise, this work presents the computer simulation of a system for noise suppression in an industrial environment, taking measurements as a starting point in a Gas Compression Station. The algorithm implemented for noise reduction is based on the theory of adaptive filters, applying filters with variable coefficients adapted by a specific algorithm, in order to obtain an adequate response. The method is explored in order to verify its effectiveness in attenuating specific noises, characteristic of the environment under analysis, aiming to allow communication between people in environments with high noise levels. The analyzed signals were acquired in the field to better represent the results. The results achieved prove the possibility of applying the proposed technique for noise suppression, although they highlight the difficulty in effectively filtering the voice signals in the studied environment.

**Keywords** – Active noise control, Adaptive filters, Gas compression station.