

## GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

### DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO E ANÁLISE CONSTANTE DE RUÍDO DISTRIBUÍDO EM REGIÕES CRÍTICAS DA UHE JUPIÁ

**AMARILDO TABONE PASCHOALINI (1); GIULLIANO BATELOCHI GALLO (2); DANIEL S. OBATA (1);  
MATHEUS SILVA PROENÇA (1); FERNANDO FERREIRA DA COSTA (2); WILLIAN JULIO SILVEIRA (2)  
UNESP ILHA SOLTEIRA (1); CTG BRASIL (2)**

#### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um Sistema de Monitoramento e Análise Constante de Ruídos para a utilização na Usina Hidrelétrica Engenheiro Souza Dias “Jupiá”. O sinal acústico adquirido é armazenado de forma integral em um cartão de memória tipo SD, podendo, também, ser acessado no aparelho via *wifi*. Os dados podem ser utilizados para análises de ruído ocupacional e *SHM* (*Structural Health Monitoring*). A finalidade do coletor é dar suporte a aplicação da Indústria 4.0 por meio da Internet das Coisas (*IoT*) e possibilitar a futura aplicação de Computação em Nuvem, análise massiva de dados (*Big Data*) e aplicação de técnicas de Inteligência Artificial. Após passar por um processo de calibração, com o auxílio de um sonômetro calibrado, o coletor foi instalado nas proximidades de um dos reguladores de velocidade (RV) da UHE Jupiá com o intuito de fazer a aquisição do ruído do ambiente. Ao final, são apresentados os resultados obtidos na forma de espectrograma e ruído em bandas de oitava. O trabalho obteve resultados promissores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Coletor de Ruídos, SHM, Saúde Ocupacional, Indústria 4.0, IoT

#### 1.0 INTRODUÇÃO

Segundo Lasi *et al.* (2014) a indústria passou por quatro fases de evolução principal. A primeira fase está relacionada à utilização da máquina a vapor. A segunda fase é definida com o uso da eletricidade e motores elétricos na produção em massa através de linha de montagem. A terceira fase é marcada pelo emprego da eletrônica e da informática com a aplicação de processos automatizados e, por fim, o que se pode ser considerado a Indústria 4.0, termo lançado em 2011 na feira alemã de Hannover, trata do emprego da Internet das Coisas (*IoT – Internet of Things*), Sistemas Cyber Físicos (CPS – *Cyber Physic Systems*) e a descentralização dos processos de manufatura. Tais etapas são apresentadas na Figura 1.

A indústria 4.0 explora toda a capacidade da interação do ambiente virtual e real e a capacidade de transmitir e compartilhar informações na rede, a fim de permitir que todo o processo de produção possa ser otimizado, desde a demanda do produto, registrada de forma online, por meio do cliente ou órgão institucional, atravessando a logística de materiais e até mesmo a configuração e o controle dos processos de produção. Para isso, as linhas de produção passam a ser monitoradas por meio de sensores e controladas por atuadores conectados à rede local da indústria ou até mesmo à própria internet, sendo observadas as possibilidades de acesso e protocolos de segurança (Devezas, Leitão e Sarygulov, 2017).

Em uma das pontas da Indústria 4.0 estão presentes a Comunicação Máquina à Máquina (*M2M – Machine to Machine*) e a Internet das Coisas (*IoT*). Tais ferramentas tornam possíveis não só a comunicação e o compartilhamento de informações diretamente entre as máquinas e dispositivos próximos, bem como, como o resto do sistema em qual estão inseridos.

Sacomano *et al.* (2018) apresentam como alguns elementos estruturantes da Indústria 4.0: a Computação em Nuvem (*Cloud Computing*), que trata do processamento remoto das informações; a análise de *Big Data*, que é o processamento de dados coletados de maneira massiva de variáveis relacionadas ao problema em questão; e a Inteligência Artificial, largamente utilizada para o reconhecimento de estados, situações e padrões bem como na tomada de decisões e da integração completa do sistema.

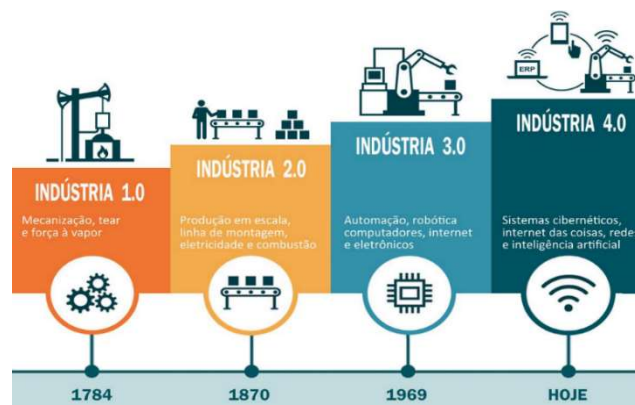


Figura 1 – Fases da indústria até o advento da Indústria 4.0.

Os sinais sonoros são ondas de pressão que podem ser percebidas e analisadas, podendo fornecer informações valiosas dos eventos que ocorrem ao nosso redor. A audição humana é capaz de perceber uma ampla faixa de pressão sonora, desde um sussurro em uma sala silenciosa, até uma britadeira no meio do trânsito de uma grande cidade. A faixa auscultada é tão ampla que seus valores não costumam ser expressos em escala linear, mas medidos em decibéis em uma escala logarítmica, capaz de representar melhor essa variação de amplitude. Já a faixa de frequência sonora perceptível ao homem, geralmente, está situada entre 20 e 20.000 Hz. Abaixo desse patamar as oscilações são consideradas infrassons, e acima desta faixa são conhecidas como ultrassons (Everest, 2001).

Mazarini (2013) aponta que várias são as fontes de vibração e ruído em uma usina hidrelétrica, como a passagem de água através das turbinas e dos seus sistemas de regulação, o funcionamento dos geradores, os dispositivos responsáveis por toda regulação do sistema elétrico e os equipamentos de manutenção.

Ganime *et al.* (2010) afirmam que a exposição prolongada a altos níveis de ruído podem ser prejudiciais ao ser humano, trazendo prejuízos físicos à audição e de formas psicológicas, causando irritação e falta de concentração, o que diminui a capacidade de produção intelectual, diminui a capacidade de julgamento e pode ocasionar até acidentes de trabalho. O ser humano não percebe no corpo, de maneira uniforme, os níveis de vibração mecânica e pressão sonora, por isto existem nas Normas, não somente as faixas de amplitudes admissíveis para cada ambiente e tipo de ocupação exercida, mas também curvas de peso aplicadas ao longo do espectro de frequências perceptível ao homem. Os sistemas de monitoramento necessitam utilizar essas curvas de correção a depender da situação em que o teste é executado.

Segundo Zinno (2018) o processo de implementação de uma metodologia de detecção e localização de danos na infraestrutura civil ou mecânica é conhecida como Monitoramento da Saúde Estrutural (*SHM – Structural Health Monitoring*). A metodologia *SHM* consiste, fundamentalmente, da coleta de dados inerentes ao sistema, como vibração e temperatura e outras variáveis operacionais e do reconhecimento de padrões de funcionamento que determinarão a operação normal ou falha.

Louzada (2013) informa que a metodologia *SHM* pode ser descrita em um processo de etapas distintas: 1) a aquisição de dados, 2) o tratamento bruto dos dados com a remoção de ruído e a identificação das características importantes, 3) a transferência e armazenamento dos dados coletados e 4) a análise das informações obtidas, bem como, a classificação do estado da saúde operacional do sistema por meio de algoritmos estatísticos, redes neurais, lógica *Fuzzy*, algoritmos genéticos, entre outros. Tais etapas podem ser observadas na Figura 2, adaptada de Vallen Systeme (2019).

Os sinais sonoros são provenientes de vibrações mecânicas das partículas do ar ao redor com a criação de ondas de pressão, é possível concluir que o acompanhamento de ruído, além examinar o bem-estar dos colaboradores e a segurança dos processos, pode inclusive obter informações relacionadas às condições de funcionamento das máquinas e demais dispositivos fabris. Também através do monitoramento de ruído é possível listar a ocorrência de eventos no tempo, cíclicos ou até mesmo acidentais, como exemplos o funcionamento de máquinas rotativas, acionamento de dispositivos e até mesmo a falha de componentes.

A Usina Hidrelétrica Engenheiro Souza Dias “Jupirá”, apresentada na Figura 3, atualmente sob concessão da CTG Brasil, foi construída com tecnologia inteiramente brasileira e concluída em 1974. A UHE Jupirá está localizada no Rio Paraná, entre as cidades de Andradina e Castilho (SP) e Três Lagoas (MS). Sua concessão foi adquirida pela CTG Brasil, em leilão do Ministério de Minas e Energia, realizado em novembro de 2015.

A UHE Jupirá em conjunto com a UHE Ilha Solteira, compõe o sexto maior complexo hidrelétrico do mundo. A UHE Jupirá tem uma barragem tem 5.495 m de comprimento e possui um reservatório de 330 km<sup>2</sup> que se estende por 514 km, banhando sete municípios de São Paulo e Mato Grosso do Sul. A usina possui 14 unidades geradoras com turbinas Kaplan com potência instalada de 1.551,2 MW e dois grupos turbina-gerador, para serviço auxiliar, com

potência instalada de 4.750 kW em cada grupo. Atualmente, após quase 50 anos, Jupiá, ao lado de Ilha Solteira, passa pelo maior processo de modernização de usinas hidrelétricas brasileiras.



Figura 2 – Fluxograma da metodologia SHM.



Figura 3 – Usina Hidrelétrica Engenheiro Souza Dias “Jupiá”

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento e Análise Constante de Ruídos. Para o tipo de aplicação que foi idealizado, o Coletor de Ruídos deve ser capaz de operar 24 horas por dia, monitorando o sinal acústico do ambiente nas faixas de frequência audíveis ao ser humano, ser capaz de realizar o processamento contínuo do sinal de áudio e permitir o acesso dos dados armazenados de forma local e remota. Espera-se desta maneira que o ruído coletado possa ser fonte de informação para análises de saúde ocupacional, *SHM*, *Big Data* e outras técnicas de Inteligência Artificial atuando no conceito de Indústria 4.0. O sistema foi testado na UHE Jupiá, mas com aplicação possível em outras usinas hidrelétricas ou na indústria em geral. Ressalta-se que o propósito dos testes nessa fase de desenvolvimento não foi quantificar o ruído na UHE Jupiá, mas fazer uma análise qualitativa do desempenho do Coletor de Ruídos.

## 2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

O Coletor de Ruídos, apresentado na Figura 4, foi idealizado para realizar a coleta sonora, processar, simultaneamente, os dados acústicos, armazenar esses dados e permitir o envio das informações para a nuvem ou para servidores remotos onde possam ser aplicadas técnicas de análise *SHM* e outras ferramentas da Indústria 4.0. A fim de atender todas estas demandas, foi escolhido um hardware capaz de operar com o Sistema Operacional Linux, e, desta forma, permitir de maneira simples a utilização de periféricos para coleta, armazenamento e transmissão de dados. O Coletor de Ruídos foi desenvolvido e fabricado pelo Grupo de Pesquisa em Engenharia

Aplicada (GPEA) do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, campus da UNESP. O *software* incorporado e suas aplicações foram desenvolvidos em conjunto com as Equipes de O&M e SST da CTG Brasil da UHE Jupia.



Figura 4 – Coletor de ruídos desenvolvido na UNESP Ilha Solteira.

Internamente, o protótipo conta com uma Placa Raspberry Pi® Zero W, executando Raspbian®, uma versão do sistema operacional Linux para arquitetura ARM®. O sistema operacional bem como os dados são armazenados através de um cartão SD de 32GB, a placa conta com interface *wi-fi* 2.4 GHz integrada e optou-se pela instalação de uma Placa de Som USB genérica com o uso de um microfone de eletreto Panasonic modelo WM-55 para a coleta dos sinais sonoros. O sistema conta também com uma bateria de lítio 18650 para suportar interrupções no fornecimento de energia e para a manutenção do relógio interno enquanto o sistema estiver desplugado da energia externa. A parte interna e alguns componentes principais do Coletor de Ruídos são apresentadas na Figura 5.

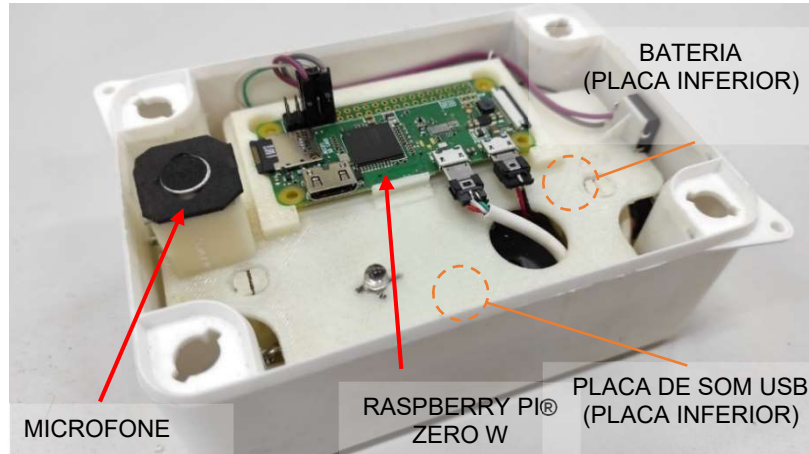


Figura 5 – Detalhe dos componentes internos do Coletor de Ruídos.

Como fonte de alimentação principal, o Coletor de Ruídos conta com entrada para fonte chaveada de 5V que permite a alimentação em 110V, 220V ou através de baterias ou carregadores externos, desde que respeitada a tensão de alimentação. Apesar da recomendação do fabricante de utilizar fornecimento de energia com capacidade de pelo menos 2A, o sistema apresentou durante seu uso o consumo médio em torno de 650mA. O *software* que controla a aquisição e realiza o pré-processamento do áudio coletado, transformando do domínio do tempo para o domínio da frequência e calculando a Densidade Espectral de Potência do sinal em intervalos de 1 minuto, é escrito em Python, com auxílio das bibliotecas SoundDevice, NumPy e SciPy. O áudio é coletado com a resolução de 16 bits e com a frequência de amostragem de 44 kHz, disponibilizando uma banda de análise entre 0 e 22 kHz. Ao final do processo, a densidade espectral calculada, utilizando janelamento do tipo *Hanning* com 1024 pontos para FTT, é armazenada no cartão SD por meio de um arquivo tipo CSV (arquivos de texto puro, onde os dados são salvos linha a linha e delimitados através de vírgulas). São gerados cerca de 1Mbytes a cada hora de coleta, porém o volume de dados pode ser reduzido de maneira relevante, se adotados outros tipos de arquivo que possuam algum tipo de compactação nativa.



O processo de calibração foi realizado no Laboratório de Acústica do Departamento de Engenharia Mecânica. Utilizou-se o sonômetro Impac® IP-900DL, conforme a Figura 6(a). Este é um sonômetro Classe 1 que realiza a medição do nível global de ruído, não possuindo filtro de oitavas. Para o processo de calibração, uma fonte de ruído branco foi posicionada a 1,0 metro do conjunto formado pelo Coletor de Ruídos e do sonômetro e, após a coleta por um intervalo de tempo de 1 minuto, o cálculo realizado pelo Coletor e o valor registrado na memória do IP-900DL foram comparados. A montagem do aparato experimental é apresentada na Figura 6(b).



Figura 6 – (a) Sonômetro Impac® IP-900DL. (b) Processo de calibração do Coletor de Ruídos.

Na Figura 7(a) é apresentado o detalhe da fonte sonora e na Figura 7(b) o detalhe do posicionamento do conjunto de medição formado pelo Coletor de Ruídos e sonômetro de referência.



Figura 7 – (a) detalhe da caixa de som utilizada no processo de calibração. (b) detalhe do posicionamento do Coletor e do Sonômetro durante o ensaio.

Como o sistema é formado por um conjunto de microfone e placa de som, este pode possuir diferentes respostas ao longo do espectro audível. Deste modo, para se obter uma calibração com menor nível de incerteza, realizou-se também a calibração por bandas de frequência. O resultado da medição de referência pode ser comparado com o ruído adquirido pelo coletor e as curvas de calibração podem ser armazenadas no *software* a fim de corrigir a resposta dinâmica característica do coletor.

Com o objetivo de testar o Coletor de Ruídos, este foi instalado no Piso das Máquinas da UHE Jupia próximo ao regulador de velocidade RV-08 (Figura 8 e Figura 9). A escolha do local foi realizada em conjunto com as equipes da CTG Brasil e da UNESP devido aos níveis críticos de ruído do local.

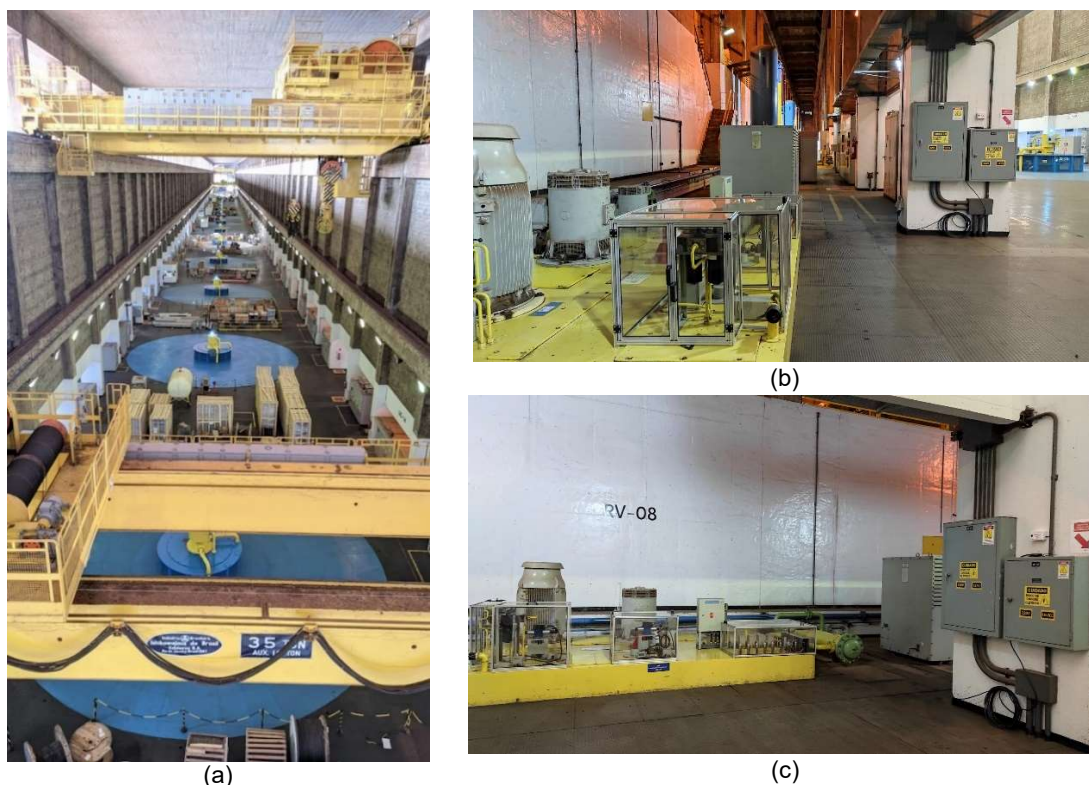


Figura 8 – (a) Vista superior do piso das máquinas. (b) Vista lateral do RV-08 e o ponto de instalação do Coletor de Ruídos. (c) Vista Frontal do RV-08 e do ponto de instalação do Coletor.

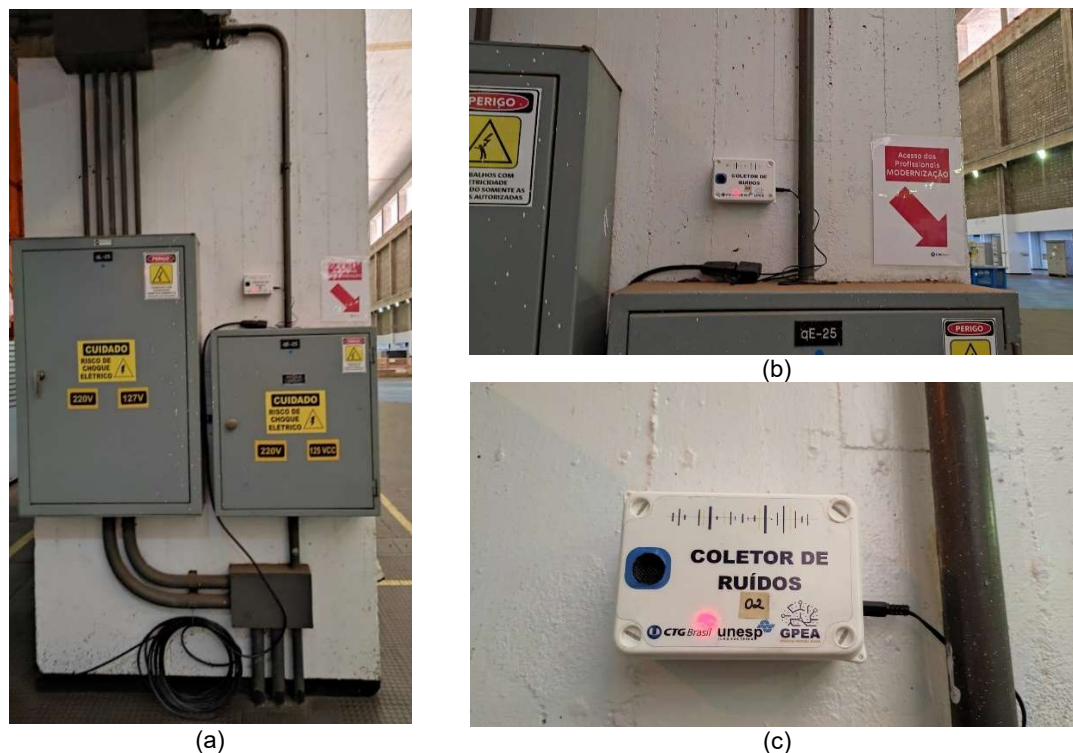


Figura 9 – (a) Pilar onde foi instalado o Coletor de Ruídos. (b) e (c) detalhes do local de instalação.



### 3.0 RESULTADOS

O Coletor de Ruídos executou a análise por um período de 24 horas entre o meio-dia do dia 12 de setembro de 2021 e o meio-dia de 13 de setembro de 2021. O Espectrograma com o ruído coletado pode ser observado na Figura 10.

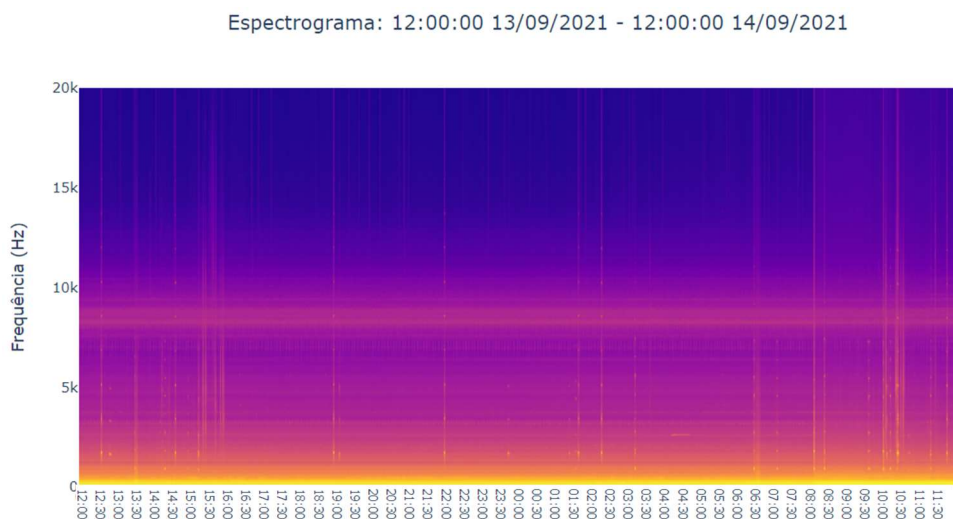


Figura 10 – Espectrograma Sonoro do Período de 24 horas de registro do Coletor de Ruídos.

No Espectrograma da Figura 10 é possível notar a presença e linhas verticais mais iluminadas. Estas linhas possuem padrão muito característico, possuem frequência fundamental bem definida e a presença de várias harmônicas como é possível ser observado na Figura 11. Ao consultar os operadores das máquinas, foi constatado que tais dados eram referentes aos silvos das sirenes de movimentação da ponte rolante que é utilizada no local e da própria unidade geradora que possui cerca de 100 alarmes diferentes para vários tipos de situação.

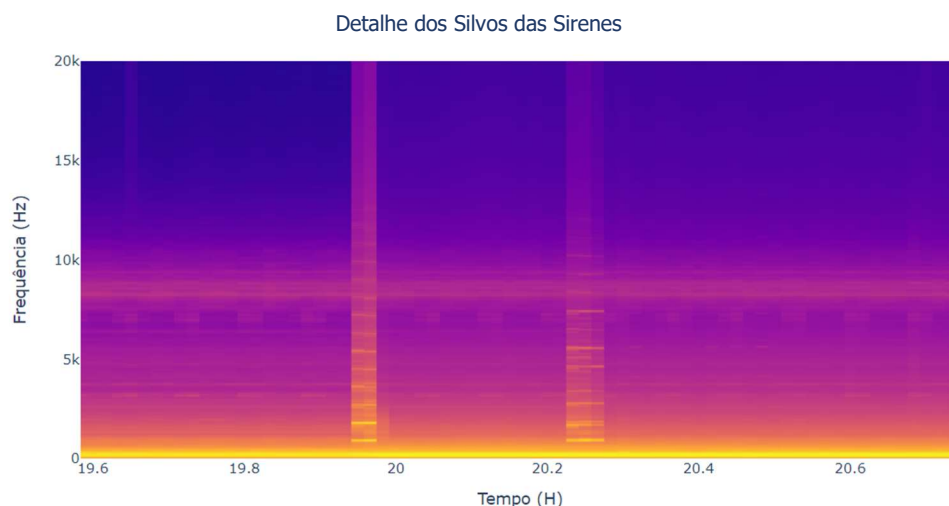


Figura 11 – Detalhe das linhas verticais mais iluminadas, decorrentes das sirenes de avisos e alarmes.

É possível notar na região final do Espectrograma da Figura 10 uma determinada iluminação geral na área final, indicando o aumento geral na amplitude do sinal em todas as frequências. Ao sobrepor a geração total da Usina no mesmo período é evidente que esse aumento de ruído se deve ao regime de operação das unidades geradoras sob maior solicitação como é possível perceber na Figura 12.



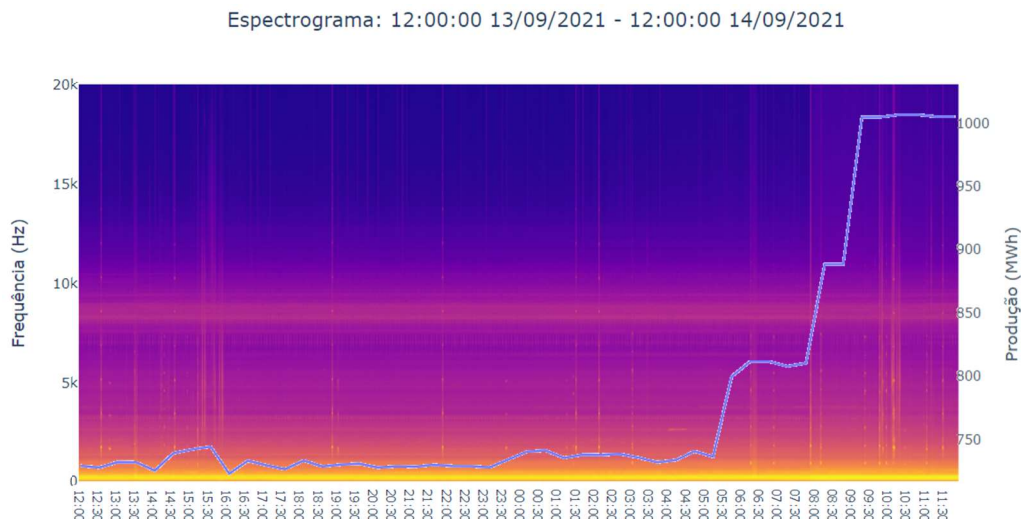


Figura 12 – Sobreposição do Espectrograma Sonoro e da Produção de Energia Elétrica nos mesmos períodos.

Do ponto de vista da saúde ocupacional, através das Densidades Espectrais de Potência é possível realizar a análise do ruído em bandas de oitava, maneira comumente utilizada para este propósito pois representa o ruído de uma maneira próxima da forma ao qual é percebido pelo ouvido humano. Na Figura 13(a) é apresentado o ruído no período de 13 de setembro das 21:00h a 24:00h, enquanto na Figura 13(b) o ruído de 14 de setembro das 09:00h a 12:00h. Com a comparação dos dois períodos, foi possível notar, no período diurno, um aumento considerável na intensidade sonora média das bandas superiores a 2 kHz.

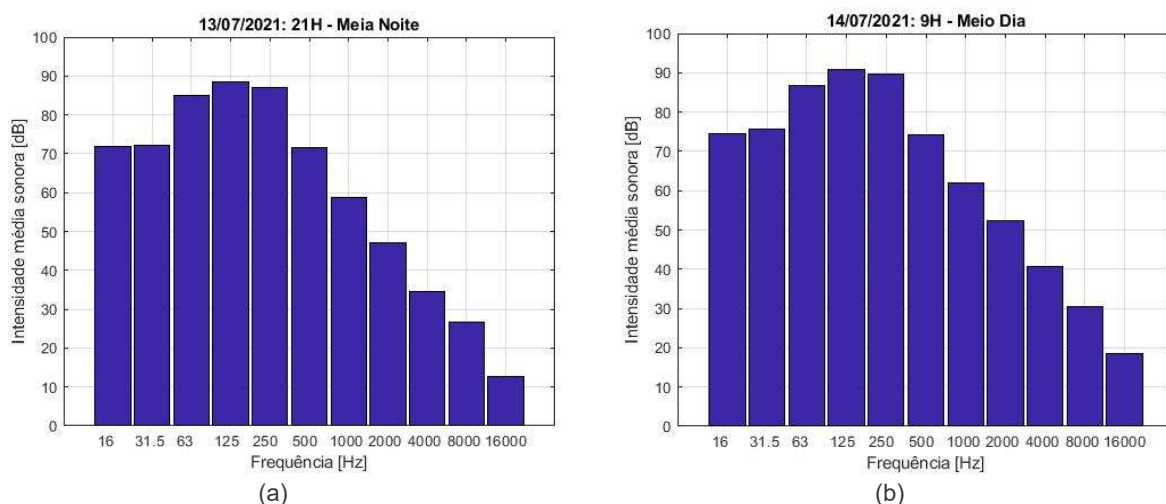


Figura 13 – Ruído representando em bandas de oitava.

Por meio da Figura 13 é possível, também, analisar com maior confiabilidade os riscos ocupacionais existentes, quanto ao agente físico ruído. Realizando-se uma avaliação por bandas de oitavas, Método Longo, tem-se uma maior confiabilidade na segurança dos trabalhadores, especificamente, 14 pontos percentuais superior ao Método Curto, mais convencionalmente utilizado. Com isso, é possível fazer o gerenciamento adequado dos métodos protetivos, e selecionar os protetores auditivos mais eficientes para este perfil de ruído existente.

#### 4.0 CONCLUSÕES

O Coletor de Ruídos desenvolvido com Sistema Operacional Linux para arquitetura ARM®, demonstrou ótimos resultados na coleta de dados acústicos na Usina Hidrelétrica de Jupia. Foi possível relacionar a densidade espectral de potência dos intervalos de 1 minuto com eventos ocorridos durante a operação e com a quantidade de energia gerada no período estudado. Também foi possível gerar o gráfico de ruídos por oitava, ferramenta importante na análise de saúde ocupacional. Por fim, considera-se que o sistema está apto a coletar e prover informação para

estratégias de monitoramento, *Big Data*, *SHM* e outros sistemas que operam em conjuntura das definições de Indústria 4.0.

## BIBLIOGRAFIA

- Lasi H., Fettke P., Kempper H.G, Feld T., Hoffmann M. Industry 4.0. Suíça, 2014.
- Devezas, T., Leitão J., Sarygulov A. Industria 4.0. Suíça, 2017.
- Sacomano J. B., Gonçalves R. F., Silva M. T., Bonilla S. H., Sátyro W. C. Indústria 4.0: Conceitos e fundamentos. São Paulo, Brasil, 2018.
- F.A. Everest. Master Handbook of Acoustics. Nova York, EUA, 2001.
- Mazarini J.A.F. Desenvolvimento de uma metodologia para elaboração de modelos de predição dos níveis de ruído do campo acústico de usinas hidrelétricas. Ilha Solteira, Brasil, 2013.
- Ganime JF., Silva, L.A., Robazzi M.L.C., Sauzo S.V., Faleiro, S.A. . O RUÍDO COMO UM DOS RISCOS OCUPACIONAIS: UMA REVISÃO DE LITERATURA. Murcia, Espanha, 2010.
- Zinno R., Artese S., Clausi G., Magraro F., Meduri S., Miceli A. Venneri. Structural Health Monitoring (SHM). Suíça, 2018.
- Louzada D. R., Detecção e caracterização de danos estruturais através de sensores a Rede de Bragg e Redes Neurais Artificiais, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- Vallen Systeme. Structural Health Monitoring (SHM), 2019. Acessado em: < <https://www.vallen.de/applications/structural-health-monitoring-shm>>

## DADOS BIOGRÁFICOS

### (1) AMARILDO TABONE PASCHOALINI



Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da UNESP (1992), mestrado (1996) e doutorado (2001) em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Desde 1996 é professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica e Eletrônica, com ênfase em Métodos Numéricos, Modelagem Computacional, Projeto de Máquinas, Bioengenharia e Empacotamento Eletromecânico e Inteligência Artificial.

### (2) GIULLIANO BATELOCHI GALLO

Graduado em Engenharia Mecânica e Pós-Graduado (Mestrado) em Projetos e Materiais pela Universidade Estadual Paulista (UNESP – Guaratinguetá) e MBA em Gestão Administrativa pela FGV. Atualmente atua na CTG Brasil como Gerente de O&M das UHes Jupia, Salto e Garibaldi, possuindo mais de 12 anos de experiência no segmento de Geração de Energia.

### (3) DANIEL HENRIQUE DE SOUSA OBATA

Graduado em Engenharia Mecatrônica [ Unisaesiano - Centro Católico Universitário Auxilium (2010)], Mestre (2014) e doutor (2019) em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Atuando principalmente nos seguintes temas: análise térmica, transferência de calor, análise de elementos finitos, vibrações, análise de sinais e iniciando pesquisas em redes neurais e inteligência artificial.

### (4) MATHEUS SILVA PROENÇA

Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - FEIS/UNESP (2017), Mestre em Mecânica dos Sólidos (2019), com ênfase em Vibrações, Métodos Numéricos e Modelagem Computacional. Engenheiro de Segurança do Trabalho (2020), com estudos na área de gestão da segurança e saúde laboral. Especialista em Empreendedorismo e Inovação Tecnológica nas Engenharias pelo convênio CREASP-UNESP-UNIVESP (2021). Atualmente, doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM-UNESP) e bolsista com projeto de pesquisa na área de detecção de vazamentos de água em redes de distribuição subterrâneas.

### (5) FERNANDO FERREIRA DA COSTA

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e MBA em Gerenciamento de Projetos pelo Instituto de Pós Graduação (IPOG - Goiânia/GO). Atualmente atua na CTG Brasil como Coordenador de Manutenção sediado na UHE Jupia, possuindo mais de 10 anos de experiência no segmento de Geração de Energia.

### (6) WILLIAN JULIO SILVEIRA

Profissional com sólida experiência na área de Engenharia de Segurança do Trabalho, atuando diretamente na gestão de departamentos SESMT/HSE. Gestão de projetos contra incêndio e pânico. Competência na implantação e certificação de ISO\_14001, ISO\_9001 e OHSAS\_18001. Experiência e habilidade na liderança de equipes. Experiência em gestão nas áreas de Segurança e Meio Ambiente, elaborando controle de riscos legais, e metodologias para medição do desempenho das áreas, regularização junto a órgãos fiscalizadores e implantação e manutenção de sistemas de Segurança e Meio Ambiente. Expertise em elaboração de laudos ambientais, ergonômicos, insalubridade e periculosidade e implementação CIPA.