



## Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH

### Sistema de Monitoramento baseado na análise sonora em usinas hidrelétricas - Voith OnCare Acoustic

ISABELA GAIBA FREITAS(1); FELIPE PERES SOZIO(1); ANDRE ALVES CUNHA(1); JOSE MANUEL NIETO DIAZ(1);  
VH(1);

#### RESUMO

Este trabalho apresenta um novo método de monitoramento em usinas hidrelétricas baseado na análise sonora. Plantas hidrelétricas são cada vez mais automatizadas e operadas remotamente, o sistema de monitoramento pelo som atua como os ouvidos da usina em tempo integral. Esta tecnologia agrega positivamente nas ações de manutenção preditiva, técnica de manutenção necessária em usinas hidrelétricas que permite identificar precocemente uma anormalidade na sua fonte, reduzindo custos de manutenção, aumentando a disponibilidade e confiabilidade do sistema monitorado.

#### PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento, Som, Preditiva, Industria, Vibração.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas são cada vez mais automatizadas e operadas remotamente, com isso, em grande parte do tempo, não há operadores situados fisicamente dentro das hidrelétricas, geralmente se realizam ciclos de serviços regulares e sistemas automatizados para detectar quaisquer anomalias que possam levar a eventos perigosos. É de extrema importância que qualquer problema seja detectado logo no início e de forma eficiente e simples.

Sistemas clássicos de monitoramento são normalmente compostos por um grande número de sensores instalados em vários locais da máquina. Estes sensores realizam a medição de diferentes parâmetros para que as condições de operação da máquina sejam determinadas da maneira correta. Os sistemas de monitoramento podem gerar alarmes ou *trips*, os valores de limite são determinados se baseando nas normas vigentes ou por resultados encontrados durante a fase de comissionamento [1].

Emissões sonoras audíveis em sistemas mecânicos são tipicamente resultado de vibrações que se originam na operação destes sistemas e que podem indicar diferentes eventos como instabilidades hidráulicas, rotação de máquina, interações eletromagnéticas, partida ou parada de compressores e etc. Tendo em vista este panorama sonoro, foi desenvolvido um sistema que é constituído basicamente por sensores acústicos (microfones), unidade de aquisição e digitalização do sinal. O tratamento e a análise do sinal podem ser realizados em um servidor alocado na própria hidrelétrica ou pode ser realizado em um servidor remoto. Os servidores remotos também são popularmente denominados “nuvens”.

Em uma planta hidrelétrica, altos níveis de vibração podem acarretar em grandes danos em componentes da unidade geradora e em sistemas auxiliares. A vibração é comumente monitorada utilizando transdutores instalados em posições específicas da unidade, fazendo com que alguns componentes acabem não sendo monitorados, esta nova tecnologia propõe o monitoramento de mais componentes da unidade utilizando um menor número de transdutores.

R. Friedrich Von Voith, 825 - Parque Nações Unidas, São Paulo - SP, 02995-000 – CEP 02995-000 Jaraguá,  
SP, – Brasil

Tel: (+55 31) 99339-5691 –Email: isabelagaiba@gmail.com.

Esse produto foi desenvolvido pela Voith e comercializado com o nome de OnCare Acoustic

## 2.0 - DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA

### 2.1 Configuração Do Sistema De Monitoramento Oncare Acoustic

Em uma planta hidrelétrica, altos níveis de vibração podem causar grandes danos em componentes da unidade geradora e em sistemas auxiliares. A vibração é comumente monitorada utilizando transdutores instalados em posições específicas da unidade, fazendo com que alguns componentes acabem não sendo monitorados. O OnCare.Acoustic propõe o monitoramento de mais componentes da unidade utilizando um menor número de transdutores.

A Figura 1 mostra o esboço do sistema de análise onde as medições de processo são comparadas com as medições realizadas pelos microfones, diferentes medições de processo podem ser utilizadas no diagnóstico da máquina como, por exemplo, potência ativa e velocidade [1]. Estes sinais são enviados para a plataforma OnCumulus, que grava esses dados em uma nuvem e atua como um *hub* de dados podendo ser acessados pela a equipe de especialistas de dados para dar suporte no *machine learning* e na melhoria contínua do sistema. Tanto o OnCare Acoustic quanto o OnCumulus aliam os conceitos da indústria 4.0, proporcionando rapidez, confiabilidade e segurança para o monitoramento destes sistemas. Estes especialistas podem comparar os dados medidos com dados globais existentes na nuvem para uma análise mais detalhada do sistema.

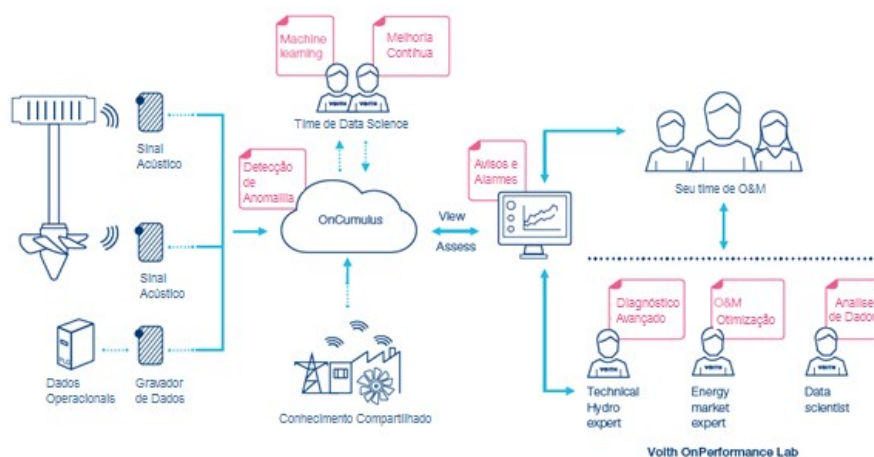


Figura 1 - Escopo do Sistema de Monitoramento OnCare Acoustic [1].

O time de especialistas podem comparar os dados medidos com dados globais existentes na nuvem para uma análise mais detalhada do sistema.

Parte da inteligência desse sistema de monitoramento é baseada no conhecimento prévio do sistema, como por exemplo, o conhecimento do espectro da máquina em amplitude e frequência. Para que o diagnóstico seja feito de maneira precisa são realizados três passos:

- Um grande número de amostras de teste deve ser coletado para obter o padrão das medições “normais” para máquina em operação. Esta é a base para detectar qualquer situação anormal ou anomalia.
- As amostras fora do padrão de normalidade precisam ser classificadas pelo tipo. Se um número razoável dessas anomalias for encontrado, então a classificação de tipos semelhantes pode ser obtida automaticamente.
- Outra classificação será seguida, onde o histórico técnico de um determinado evento de som é levado em consideração para a análise. Essa classificação técnica inclui a análise de eventos reais que ocorrem localmente, mas inclui também a experiência passada, já armazenada no sistema, ou os especialistas envolvidos.

Com esses três passos, o sistema poderá ser treinado para também diagnosticar eventos específicos e não apenas detectar anomalias [1].

## 2.2 Hardware OnCare Acoustic

A Figura 2 mostra os principais componentes do OnCare Acoustic. Ele é composto por um conjunto de microfones e uma blue box que atua como gravador dos sinais sonoros, se trata de um sistema simples de instrumentação pouco invasiva, fato que proporciona vantagens no tempo de montagem, diminuindo os custos envolvidos nesta atividade.

Tabela 1 – Dados Técnicos do Microfone

Tipo de Microfone	IEPE
Sensibilidade	50 mV / Pa
Faixa de frequência	5 – 20KHz

Tabela 2 - Dados Técnicos do Gravador

Ambiente	40 - 85 ° C, <95% de umidade
Hardware	Texas Micro com interfaces industriais padrão
Processador	ARMv7: 800 MHz
Requisitos de Energia	24 V 1,2A
Dimensões	215 x 60 x 176 mm
Sistema Operacional	Linux



Figura 2 - OnCare Acoustic.

Sistemas avançados de monitoramento não podem ser realizados com computadores tradicionais autônomos. Os algoritmos de aprendizado precisam considerar muita informação de histórico, portanto muita memória e CPU. Existem duas maneiras principais de superar tais limites do sistema: “scale-up” e “scale-out” [1]:

“Scale-up” significa que o poder de computação é aumentado em caso de gargalos, adicionando processadores mais rápidos e mais memória. Quanto maior o número de sensores conectados ao sistema maior é a demanda por taxa de amostragem. É possível que o sistema chegue ao seu limite e não consiga realizar mais “Scale-up”. A solução para este problema é o “scale-out”, ou seja, distribuir aplicativos usando computação em cluster. Tal poder computacional distribuído está hoje disponível como a chamada “computação em nuvem”. As aplicações agora são projetadas de forma modular, que se distribuem automaticamente em clusters de computadores.

Este método de processamento tem alto grau de complexidade em seu desenvolvimento, mas traz grandes vantagens no diagnóstico de falhas. É possível adicionar mais inteligência ao sistema, a comunicação e aprendizado entre as plantas, aumentando assim a capacidade de interpretação correta das medições.

## 2.3 Sistema de Medição

O posicionamento dos microfones é um ponto muito importante a ser levado em consideração, estas posições podem variar de máquina para máquina devido aos diferentes tipos de máquinas existentes, características de construção, tipo de casa de força e medições solicitadas em regiões específicas da máquina por

exemplo. Uma equipe especializada vai a campo e realiza o estudo para garantir que o posicionamento dos microfones seja feito da maneira correta. A Figura 3 mostra algumas das possíveis posições de medição.

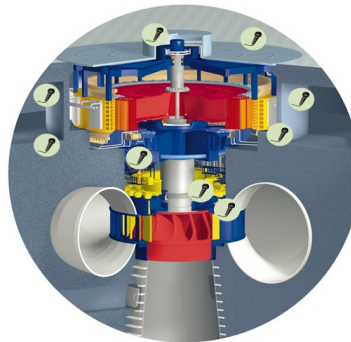


Figura 3 – Posicionamento dos Microfones.

#### 2.4 Detecção de Anormalidades

A Figura 4 mostra as medições realizadas por cinco microfones em diferentes locais da unidade para a se ter noção do que o OnCare Acoustic pode ouvir e diagnosticar. As sequencias de partida são comumente padronizadas, o algoritmo do OnCare Acoustic consegue a partir do learning machine, criar um padrão de normalidade do sinal, comparar as partidas, identificar alguma anormalidade no procedimento e alertar o operador a existência de um problema.

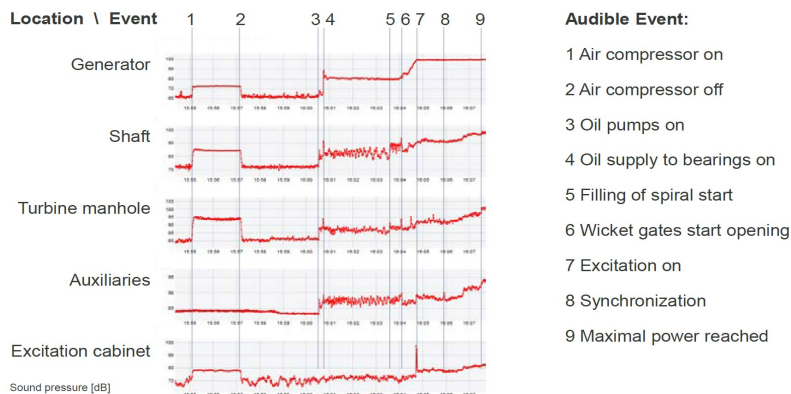


Figura 4 - Análise da Partida da Máquina [2].

Na fase de aprendizado o sistema de monitoramento envia uma grande quantidade de avisos porque todo ruído é novo para o sistema. Com o passar do tempo o número de avisos cai significativamente pois o algoritmo passa a identificar os padrões de normalidade. Este padrão é definido após duas a quatro semanas de medições, este tempo varia de máquina para máquina, quanto mais padronizada as operações da máquina, mais rápido os padrões serão definidos.

A Tabela 3 mostra exemplos de eventos que foram identificados por ruídos audíveis. Estes eventos foram classificados utilizando o know-how de especialistas da Voith e não estão limitados a um tipo específico de máquina. Podem ser utilizados como parâmetro de comparação em sinais futuramente medidos. A identificação precoce destes eventos pode evitar grandes danos evitando custos com manutenção [2].

Tabela 3 - Falhas Detectadas pelo Som [2].

Tipo de Turbina	Potencia Nominal	Tipo de Ruído	Causa Raiz	Dano
-----------------	------------------	---------------	------------	------

Kaplan	20 MW	Ruído da passagem da pá e <b>gate passing frequency</b>	Larger blade tilt resulted in interaction with draft tube man door	High vibrations, potential leakage of man door
Kaplan	40 MW	Rattling of cast oil pressure line	Resonance in hydraulic system	Potential rupture of pipe
Kaplan	160 MW	Ruído periódico no anel deslizante	Generator unbalance	Fire at slip ring
Francis	180 MW	Ruídos do Transformador	Audible noise was not reported	Fire in transformer
Francis [4]	440 MW	Ruído sonoro de tom alto	Runner blade crack	Potential bigger damage
Bomba de Armazenamento	50 MW	Ventilador do gerador causou ruídos em torno de 100Hz	Faulty mounting (insufficient stiffness)	Potential loss of equipment
Bomba de Armazenamento	240 MW	Ruído potencialmente audível dentro da caixa do gerador	Loose rotor fan blades	Stator required significant refurbishment

#### 2.4.1 Ruído de Fundo

Outro padrão importante a ser definido, mas neste caso para a eliminação do mesmo, é o ruído de fundo. A Figura 5 mostra o espectro do sinal sonoro coletado quando a unidade estava em rotação nominal.

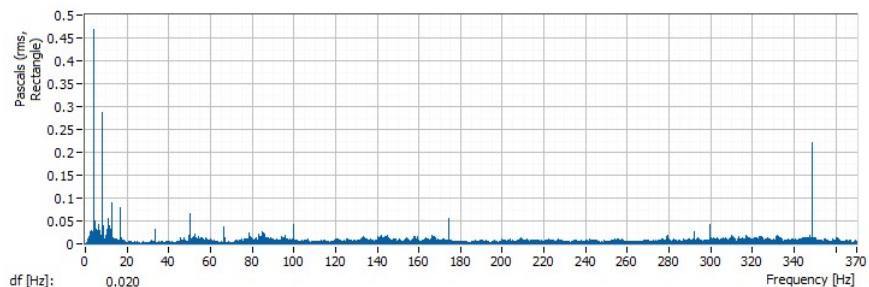


Figura 5 - Medição do Som com a Unidade em Rotação Nominal [3].

A Figura 6 mostra o sinal acústico bruto no domínio do tempo do momento em que a máquina esta parada até atingir a velocidade nominal. É evidente que a amplitude do som aumenta significativamente devido ao som característico da máquina quando está em operação. O ruído ambiente juntamente com a partida da máquina podem gerar medições imprecisas porque a amplitude do sinal acústico gerado pela máquina ira se somar ao ruído de fundo.

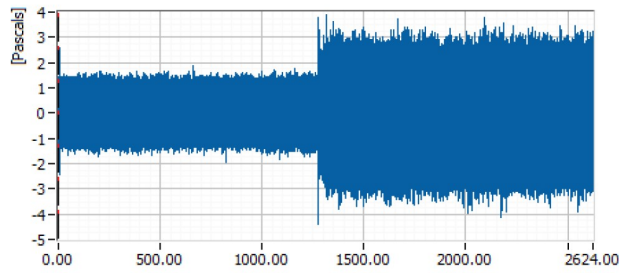


Figura 6 - Sinal sonoro bruto [3].

Para eliminar este problema foi feita análise de frequência do sinal acústico quando a máquina ainda estava parada e após início da rotação. A Figura 7 mostra a análise de Fourier do ruído ambiente e a Figura 8 mostra o espectro do sinal com a máquina em rotação. Os picos presentes quando a máquina está parada podem aparecer com o mesmo valor de amplitude ou com amplitudes maiores quando a máquina está em rotação caso exista algum outro sinal sonoro de mesma frequência, estes sinais não podem ser explicados do ponto de vista vibracional, pois existem picos de mesma frequência para as duas condições da máquina.

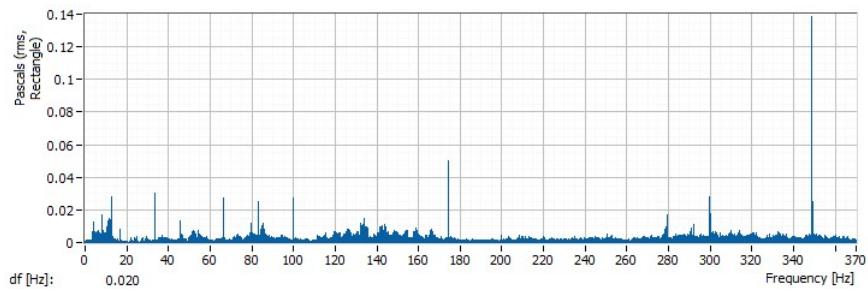


Figura 7 - Espectro do Ruído de Fundo com a unidade parada [3].

A Figura 8 mostra que o sinal acústico possui um pico em 100 Hz, mas sua amplitude é menos dominante no sinal com medições tradicionais de vibração mostrado na Figura 9. A razão para este comportamento é que os 100 Hz são ruídos de fundo. Isso pode ser verificado na Figura 6 onde o pico é visível no espectro de ruído ambiente.

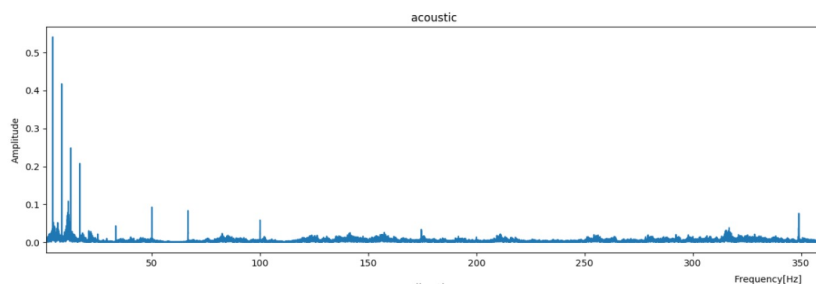


Figura 8 - Medições sonoras com a unidade parada [3].

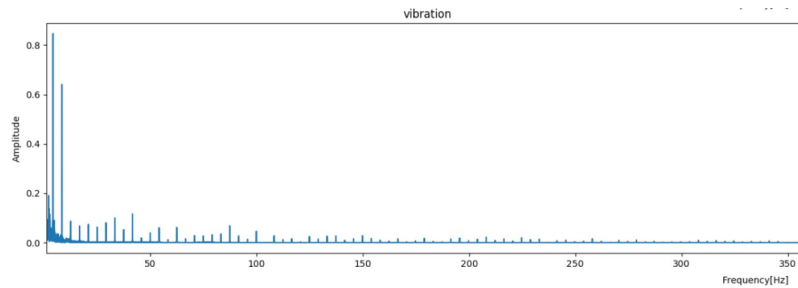


Figura 9 - Medições de Vibração com a unidade parada [3].

Visando uma análise mais aprofundada do pico em 100 Hz, um conjunto de microfones foi instalado no poço da turbina, o que nos permitiu localizar a fonte desse som. Foi identificado que o transformador de excitação estava gerando este som, ele fica localizado atrás de uma porta entre as duas turbinas no poço da turbina. A razão física por trás de geração deste ruído são forças eletromagnéticas no transformador. As forças são proporcionais ao quadrado da amplitude da amplitude da corrente elétrica. Portanto, sua frequência é o dobro da frequência da rede (50 Hz) [3].

A Figura 10 mostra a medição sonora no tempo e seu espectro na frequência com os seus picos sendo evidenciados, o OnCare acoustic é capaz de detectar esses picos e identificar qual a origem deles.

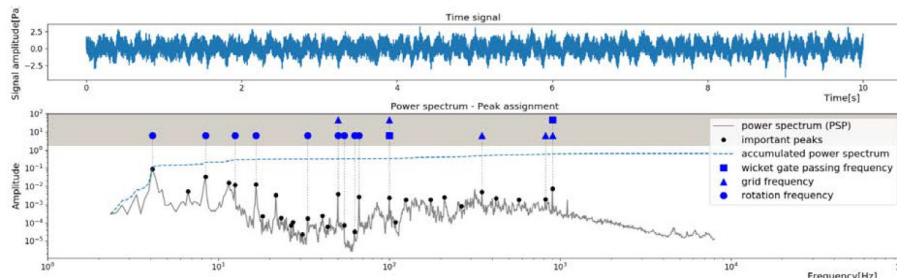


Figura 10 - Sinal Sonoro no Tempo e Espectro medidos no poço da turbina [3].

### 3.0 - SISTEMA DE MONITORAMENTO ONCARE ACOUSTIC APLICADO EM PLANTA HIDRELÉTRICA NA ÁFRICA

O sistema de monitoramento pelo som foi instalado na usina de Hamfurth localizada em Edersee. A usina possui 2 unidades geradoras de 10MW, uma das unidades foi equipada em 2016 com o OnCare Acoustic.

A solução proposta coloca um forte foco na segurança e privacidade em relação à comunicação e evita qualquer interferência com o sistema de segurança, proteção e controle da usina hidrelétrica por projeto. O acesso ao sistema de monitoramento é fornecido por meio de um painel baseado na Web, de modo que o operador possa investigar e classificar possíveis problemas rapidamente. Enquanto o operador geralmente tem várias tarefas, o sistema automatizado monitora o equipamento continuamente e apenas levanta um aviso ou alarme no caso de um comportamento incomum da máquina ser observado [2].

Uma unidade hidrelétrica possui ruídos típicos com frequências características, o primeiro algoritmo desenvolvido utilizou medições pré-existentes para que houvesse um padrão de normalidade de operação definido.

A Figura X mostra o agrupamento dos clusters dos resultados obtidos comparando as amostras coletadas com as medições de vibração instaladas na máquina, é possível visualizar os clusters de operação típicas (pontos em roxo). A cor (e tamanho) dos pontos indica o número de observações e, assim, constrói os diferentes clusters.

Os pontos amarelos representam os clusters de comportamentos atípicos da máquina, estas medições podem ser originadas devido à interação do estator do rotor da turbina, o gerador, ou ventiladores e bombas. Os Pontos pretos são outliers individuais.

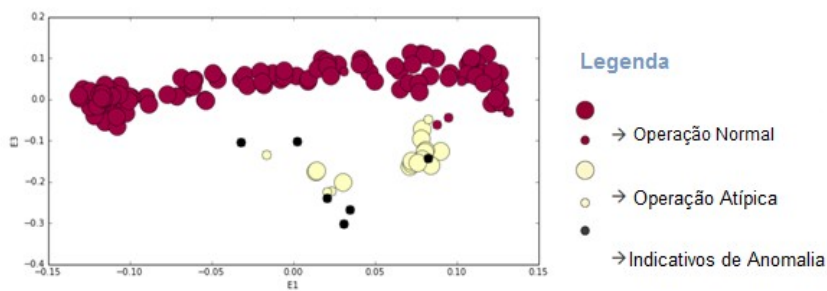


Figura 11 – Agrupamento de Clusters Identificando anomalias automaticamente [2].

Analisando os sinais no tempo podemos perceber que alguns sinais foram afetados durante a ocorrência da anomalia, coincidindo com a região amarela ver Figura X. O evento ocorreu no dia 07 de abril entre 9:00 e 15:00h, ver Figura 12.

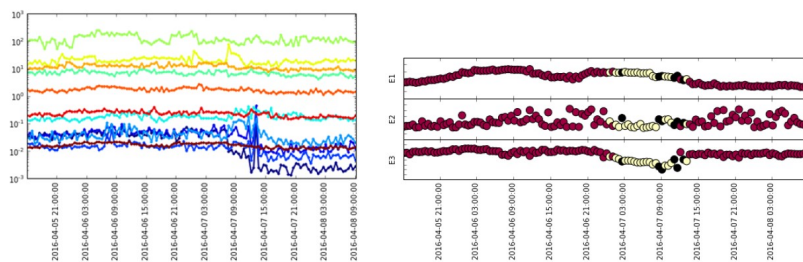


Figura 12 – Comparação com o sinal no tempo [2].

O algoritmo foi capaz de determinar uma anomalia nos dados recebidos. A razão para a mudança súbita nos sinais infelizmente não é conhecida. Em uma implementação real do sistema, essa anomalia agora seria classificada, rotulada e potencialmente conectada a uma tarefa específica de manutenção ou serviço, a fim de tomar ações, uma vez que o sistema reconheça a repetição do evento.

Na fase de aprendizagem do sistema todo ruído é considerado novo, portanto um grande número de avisos é gerado. Esse número de avisos reduz significativamente com o aprendizado do sistema, o algoritmo define os padrões de normalidade da máquina e passa a identificar com alta precisão as anomalias. Um exemplo de aplicação desta característica foi realizado em Edersee.

O nível do reservatório é constantemente monitorado, medindo as variações sazonais do reservatório. A Figura 13 mostra os níveis reais de água de 2016 e 2017 em comparação com o nível de água do reservatório.

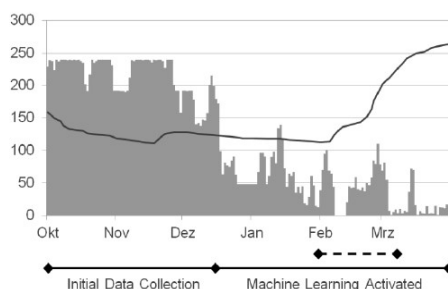


Figura 13 - Nível de Água em Edersee em 2016 (esquerda) e 2017 (direita) em comparação com o nível médio de água nos últimos 15 anos [4].

A Figura 14 mostra a quantidade de avisos gerados no período de 6 meses, podemos notar que nos primeiros 3 meses de operação um grande volume de avisos foi gerado. Este foi o período de tempo necessário para o OnCare Acoustic aprender e definir os padrões de operação normal do sistema. Definidos estes padrões o número de avisos caiu drasticamente, mostrando que o algoritmo funcionou.

É possível notar que o número de avisos aumentou no período de fevereiro a março, isto se deve a variação brusca no nível de água em 2017. Essa elevação do nível da água causou o aumento da potência típica das máquinas e gerou ruídos fora do padrão definido no OnCare Acoustic. Posteriormente o algoritmo se ajustou a essa condição e o número de avisos diminuiu novamente [4].





**Figura 14 – Número de avisos gerados em 6 meses de instalação do OnCare Acoustic[4].**

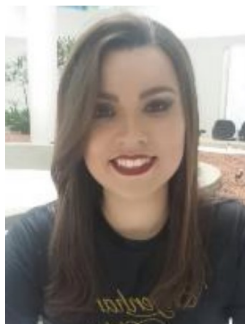
#### **4.0 - CONCLUSÃO**

Este novo método de monitoramento de usinas hidrelétricas mostrou resultados promissores visto que o algoritmo é capaz de aprender com a unidade monitorada aumentando sua confiabilidade e disponibilidade, identificando de maneira precisa e precoce as anormalidades que possam ocorrer no sistema. A combinação entre o sistema instalado em campo, o envio de dado para nuvem e o acesso remoto destes dados torna o sistema mais inteligente, pois ele está em melhoria contínua, seja pelo algoritmo instalado ou pelo time de experts que podem enviar informações para melhorar o diagnóstico da máquina. Todas essas características permitem que cada vez mais técnicas de manutenção preditiva possam ser aplicadas, diminuindo custos com manutenção e aumentando a disponibilidade de sistemas.

#### **5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (1) MUENCH, R. Acoustic monitoring system based on a safe and secure cloud approach; HYDRO 2018 – Alemanha.
- (2) MUENCH, R., FLEMMING, F. Advanced Monitoring System for remote Hydropower Plant in Africa; HYDRO 2017 – Alemanha
- (3) DIAZ, J., FLEMMING, F., ENGELS, K., KUNKEL, F. Correlation between Vibrations and Acoustic Emissions of a Hydropower Plant; HYDRO 2017 – Alemanha
- (4) MUENCH, R., FLEMMING, F., ENGELS, K., KUNKEL, F. Experiences of First Pilot Installation of a Cloud Based Monitoring System for Hydropower Equipment; HYDRO 2017 - Alemanha

#### **6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS**



Isabela Gaiba Freitas

Nascida em Vitória, Espírito Santo, em 1989, formada em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Possui 1 ano e meio de experiência na Voith Digital Ventures em sistemas de monitoramento de vibrações de PCH's , UHE's e Compensadores Síncronos.