



**Grupo de Estudo de Geração Térmica-GGT**

**SISTEMA DE EMISSÃO ACÚSTICA PARA MONITORAMENTO CONTÍNUO DOS BALÕES DE ALTA E BAIXA PRESSÃO DA USINA ELÉTRICA A GÁS DE ARAUCÁRIA - UEGA**

**LEONARDO MENEGUINI PIRES(1); EDUARDO MASSASHI YAMAO(1); FELIPE TABORDA RIBAS TOVAR(1); LEONARDO SIRINO(1); SAMUEL CAVALLI KLUTHCOVSKY(1); PAOLO ROMULO MARCACUZCO CUEVAS(1); PAULO CRISTIANO MORO(1); CARLO GIUSEPPE FILIPPIN(1); NESTOR CARLOS DE MOURA(1); MARCO A. LUZIO(1); LOURIVAL SILVA JUNIOR(2); CINTIA DE CARVALHO TOLEDO(2); LACTEC(1);UEGA(2);**

**RESUMO**

Vasos de pressão são essenciais em turbinas a vapor utilizadas na geração termelétrica e vêm sendo amplamente utilizados na produção, transporte e armazenamento de diversos fluidos necessários para operação dentro de uma planta termelétrica. Uma interrupção súbita do suprimento destes fluidos pode acarretar em danos severos ao equipamento. Portanto, para garantir a segurança de operação da Usina Elétrica a Gás de Araucária (UEGA) se justifica a instalação de um sistema de monitoramento contínuo de parâmetros associados à integridade física dos balões de alta e baixa pressão desenvolvido pelo Lactec em um projeto de P&D.

**PALAVRAS-CHAVE**

Vasos de Pressão, Monitoramento Contínuo, Emissão Acústica (EA), Usina Termelétrica, Integridade Estrutural

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Um Sistema para Monitoramento de Integridade Estrutural (SMIE) avalia os componentes críticos em tempo real durante a operação de um ativo e facilitar nas decisões de gerência do ciclo de vida de sistemas mecânicos (HALL; CONQUEST, 1999). Para o caso de uma usina termelétrica o monitoramento proposto é realizado através de sensores de Emissão Acústica (EA), sensores de temperatura e pressão. Os sensores de EA foram instalados em regiões de interesse com grandes esforços e perdas de carga, locais de fluxo turbulento, cordões de solda e regiões com concentradores de tensão mecânica. O método de emissão acústica vem se mostrando adequado em aplicações de monitoramento contínuo por ser uma técnica não destrutiva e não intrusiva para detecção e localização de trincas em estruturas metálicas, é uma técnica relativamente nova e rapidamente vem ganhando espaço no cenário de monitoramento (HARRIS;DUNEGAN, 1974) .

A inspeção realizada por meio da técnica de EA na Usina Elétrica a Gás Araucária (UEGA) pode ser dividida de acordo com sua abordagem, ou seja, monitoramento contínuo e periódico de ativos da planta termelétrica relacionados ao armazenamento e transporte de vapor.

A primeira abordagem é a avaliação e identificação de defeitos e falhas em vaso de pressão. As descontinuidades podem ser causadas por pressões que ultrapassem a pressão máxima de trabalho admissível (PMTA), ocasionando no surgimento de sinais acústicos criadas pelo crescimento de trincas no vaso de pressão. Os sinais são captados pelo sistema de EA para a avaliação de integridade (GROSSE et al, 2008) (INASAKI, 1998)

A segunda situação é a verificação da estanqueidade de válvulas e conexões, ou seja, o controle de vazamento de vapor. Tal abordagem é possível, pois em uma região de escape do fluido gera sinais sonoros de baixa frequência que serão captados pelo sistema de EA podendo assim indicar a existência de passagem de fluxo

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

e conseqüentemente a detecção de vazamentos, tornando a operação da válvula segura e evitando dessa forma prejuízos, mitigando possíveis danos ao patrimônio.

Para o projeto de monitoramento na UEGA foi escolhido realizar o monitoramento contínuo nos balões de alta pressão e baixa pressão visto que são componentes relevantes para o funcionamento da usina. Foram dispostos sensores piezolétricos em torno dos vasos de pressão para posterior análise dos resultados e verificar a existência de descontinuidades.

## 2.0 - SISTEMA PARA MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL (SMIE)

Structural health monitoring (SHM) ou Sistemas para Monitoramento de Integridade Estrutural (SMIE) englobam todos os tipos de sistemas e técnicas de detecção e caracterização de danos, com a finalidade de constatar resultados confiáveis em relação a estrutura monitorada e garantir um acompanhamento contínuo do ativo de forma a manter um status atualizado do ativo para que a equipe de manutenção saiba o mais rápido possível caso haja alguma descontinuidade aparente.

Os princípios fundamentais de um SMIE para se avaliar alguma avaria estrutural são divididos em compreender que todo material apresenta falhas ou defeitos inerentes e que para se avaliar o dano estrutural necessita-se da comparação de pelo menos dois estados (estado sem defeito e o estado a ser estudado) e para a análise da localização e do grau do dano, recomenda-se um aprendizado supervisionado e de um sistema de processamento de dados, ver Figura 1.

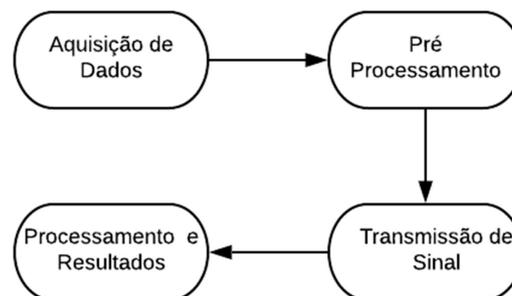


FIGURA 1 – Fluxograma do ciclo de aquisição de dados.

O uso de ferramentas ou instrumentos de medição, como sensores, são escolhidos de maneira a ter um resultado consistente a partir da análise dos dados em um certo intervalo de tempo. O processamento e conversão de dados são essenciais para um bom entendimento das variáveis que estão influenciando nos valores obtidos, já que podem existir um sinal falso positivo de defeito ou presença de ruídos que alteram as conclusões finais do estudo. Com o processamento e análise dos dados, os resultados serão obtidos à partir da comparação dos dados da avaliação estrutural antes do defeito e outro após o dano (LUNDGAARD et al, 1998).

### 2.1 Método de Emissão Acústica (EA)

Entre os SMIE, o método de Emissão Acústica (EA) é considerada única dentro do domínio dos ensaios não-destrutivos. Isso se deve ao fato de que o método de Emissão Acústica pode ser realizado durante o funcionamento, diferente dos outros tipos de técnicas que se deve interromper a máquina em operação para realizar os ensaios. O sistema de monitoramento por Emissão Acústica consegue captar os primeiros estágios da propagação de trinca antes da falha catastrófica (RODRIGUES, 2012)

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

Tensões em um campo localizado podem gerar um aumento no tamanho das descontinuidades, liberando ondas elásticas que percorrem o material e são captadas pelos sensores que estarão dispostos em torno da estrutura. Esses sensores capturam as oscilações mecânicas e convertem em um sinal elétrico, e por fim encaminham a resposta para o sistema de EA onde será amplificado e parametrizado para fins de análise de resultados.

As técnicas podem ser classificadas como ensaios ativos e passivos, na qual a primeira se refere as técnicas que utilizam uma fonte externa para emitir um sinal que passará pelo material para chegar no receptor. Já no caso das técnicas passivas, a própria fratura gera um sinal que o receptor consegue captar para posterior análise dos dados. A técnica de Emissão Acústica é considerada uma técnica não-destrutiva passiva (FILIPPIN et al,2017).

Utilizou-se os sensores piezoelétricos, já que o material piezoelétrico é montado entre duas placas metálicas que suportam a tensão mecânica e, portanto, atuam como eletrodos (TIBONI, 2011). Caso nenhuma tensão mecânica seja aplicada sobre a estrutura as cargas positivas e negativas têm a mesma magnitude e não existe nenhum momento de dipolo molecular. No momento em que ocorre uma tensão mecânica, é gerada uma distribuição não simétrica nas cargas, gerando um momento de dipolo que como consequência provoca uma diferença de potencial. A propagação de uma onda mecânica na superfície do material gera uma diferença de potencial no sensor piezoelétrico que é transferida para o sistema de aquisição, ver Figura 2.

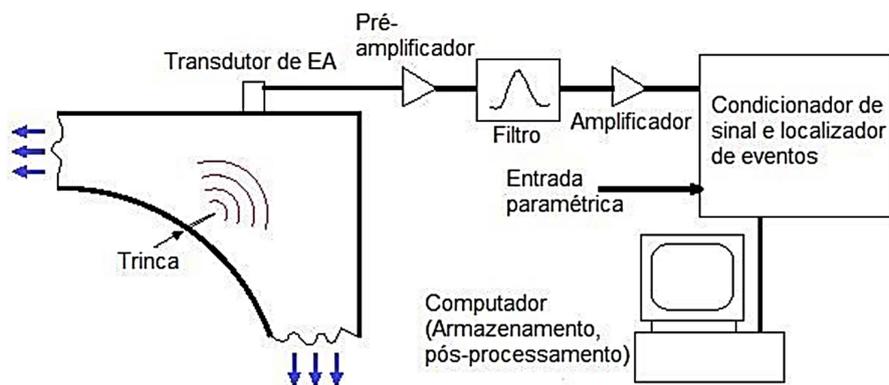


FIGURA 2 - Princípios do sistema de EA.

Em situações onde o fenômeno a ser monitorado é vazamento, perda ou passagem de fluidos em sistemas pressurizados, os sensores de EA detectam o fluxo turbulento do fluido passando pelo orifício.

A inspeção por emissão acústica pode ser aplicada a uma grande variedade de estruturas, como tubulações, válvulas e vasos de pressão, portanto, sendo considerada uma técnica de inspeção global. Outra vantagem é que a técnica abrange uma faixa de diferentes tipos de materiais e espessuras que podem ser utilizados para realizar ensaios (FILIPPIN et al,2017).

### 3.0 Vasos de Pressão

Vasos de pressão são equipamentos de dimensões e finalidades variáveis, capazes de manter fluidos pressurizados em seu interior (CAMPOS, 2011). Portanto, podem ser construídos em diversos materiais, como fibra de vidro, aço carbono, alumínio e aço inox além de apresentarem diferentes formatos geométricos como esférico, cônico e cilíndrico, de acordo com sua utilização na indústria, Figura 3 (BRASIL, 2006).

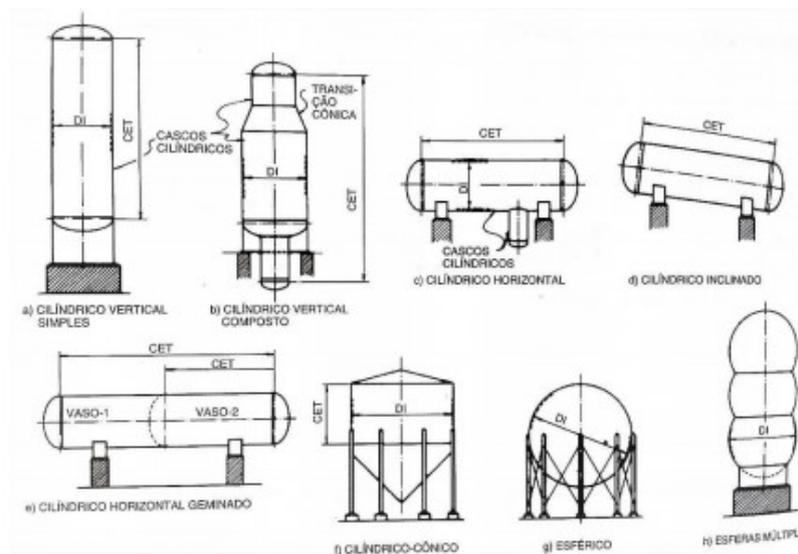


FIGURA 3 – Principais formatos de vasos de pressão.

Fonte: Telles, 1996

Devido ao seu conteúdo em alta pressão, estes equipamentos são considerados de elevada periculosidade, sendo necessária a padronização de parâmetros de segurança, como documentos e registros, projetos de instalação, dispositivos de segurança e identidades. Bem como a normatização da inspeção, operação e manutenção destes, as quais estão presentes na Norma Regulamentadora número 13 (NR-13) de portaria 3.214/78 do Ministério do Trabalho (BRASIL, 2006).

Alguns exemplos de vasos de pressão são: caldeiras, aquecedores, resfriadores, condensadores, entre outros (TELLES, 1996), possuindo diversas utilidades em indústrias de processamentos, como química e petroquímica, indústrias de alimentos e usinas de geração de energia (PEREIRA FILHO, 2014).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de 7.433 empreendimentos de geração de eletricidade em operação no país, 3.006 são usinas termoeletricas, estando em maior número quando comparada com centrais geradoras eólicas (614 unidades) e usinas hidrelétricas (217 unidades) (ANEEL, 2019).

Para a produção de energia elétrica em termelétricas, se faz necessário a queima de combustível fóssil, como carvão, óleo ou gás, de forma a aquecer caldeiras contendo água, para que o vapor liberado em alta pressão e temperatura se expanda, girando a turbina do gerador e transformando assim potência mecânica em elétrica. Nesse processo, os vasos de vapor podem ser utilizados para transferência de calor do sistema, conduzindo o vapor que moverá as turbinas, e, no caso de termelétricas a gás, para armazenar o gás combustível que participará do aquecimento da caldeira. Os principais problemas que envolvem vasos de pressão são sobrepressão do fluido e bloqueios inadvertidos podendo ser evitados quando realizada inspeção periódica corretamente e se instalados dispositivos de segurança, como discos de ruptura e plugues fusíveis, e válvulas, bem como instrumentos que indiquem a pressão de operação, que podem ser instalados no vaso ou em sala de controle apropriada, conforme descrito na NR-13 (BRASIL, 2006).

#### 4.0 MONITORAMENTO UEGA

A Usina Elétrica a Gás de Araucária Ltda (UEGA), localizada no município de Araucária, no Estado do Paraná, é uma usina termelétrica a gás natural que atende o mercado de energia elétrica das regiões Sul e Sudeste através do Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo despachada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

A U.E.G. Araucária possui duas turbinas a gás natural e uma turbina a vapor, operando em ciclo combinado, que são responsáveis pela geração de 469 MW de potência a plena carga. Os gases gerados a partir da combustão nas turbinas a gás passam por um recuperador de calor que aquece duas caldeiras que alimentam a turbina a vapor. O sistema de transporte de vapor é composto por vasos de pressão e tubulações que operam em condições de grandes esforços mecânicos, altas temperaturas e carregamentos cíclicos.

Dessa forma, o intuito do projeto é realizar o monitoramento contínuo em elementos essenciais para o sistema de geração de vapor de modo que haja um aumento na confiabilidade na operação da turbina a vapor. As regiões críticas escolhidas para serem monitoradas pelo sistema de emissão acústica foram os balões de alta e baixa pressão da caldeira, que podem ser classificados como vasos de pressão, sendo que tais ativos são responsáveis por alimentar a turbina a vapor e uma falha nesse elemento pode gerar uma intercorrência catastrófica (caso haja dano a integridade da equipe ou equipamento) ou prejudicial ao fornecimento de energia (UEGA, 2019)

#### 4.1. Monitoramento Contínuo

Para possibilitar o fornecimento, ao sistema computacional, das informações essenciais necessárias para a avaliação da integridade estrutural das instalações e equipamentos pertinentes ao projeto, foram estudadas diversas possibilidades. Nos balões de alta e baixa pressão foram colocados sensores de EA.

Numa avaliação prévia recomendou-se posicionar os sensores de EA fora da região de isolamento térmico da caldeira de recuperação, de modo a proteger sua integridade e durabilidade com possíveis reduções de custos de aquisição. Para isso seriam utilizados guias de onda, destinados a conduzir para o exterior da caldeira os sinais sonoros captados nos pontos recomendados.

##### 4.1.1 Instalação da Infraestrutura para Monitoramento.

Para realizar o monitoramento por EA em torno do balão de alta pressão e do balão de baixa pressão foi necessário instalar uma infraestrutura para a instalação do sistema de monitoramento como painéis elétricos, cabos, eletrocalhas e uma unidade móvel para ensaio.

Sendo assim foram instalados dois painéis de conexão para os sensores, um no alto junto a caldeira e outro junto a unidade móvel localizada no nível do sistema computacional. Essa estratégia foi tomada, para facilitar a substituição de algum cabo que estivesse danificado e para ajudar na mudança de layout, caso necessário.

Além dos painéis foram colocados cabos conectando os painéis, esses foram fixados nas eletrocalhas já existentes na caldeira da usina. A partir do painel superior as eletrocalhas acomodam os cabos do painel até os sensores. Um esquema da instalação pode ser observado na Figura 5. A Figura 4 demonstra a posição em que a unidade móvel está localizada próxima a usina, juntamente com o painel inferior.



FIGURA 4 – Unidade móvel.

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

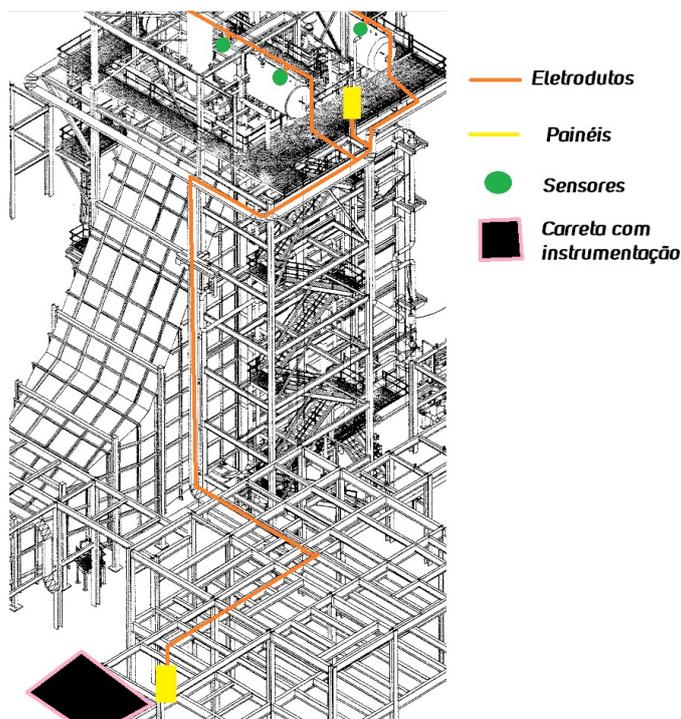


FIGURA 5 – Esquema de instalação dos cabos.

#### 4.1. 2 Sensores e das guias de onda.

Para o sistema de monitoramento por Emissão Acústica foram instalados, dezessete sensores de EA no total. Sendo dez sensores no balão de alta pressão, seis no balão de baixa pressão e um como sensor de chuva.

Como a superfície dos balões apresentam temperaturas superiores à de operação dos sensores de EA, optou-se pela instalação de guias de onda para a atenuação térmica. As guias de onda foram conectadas, apenas por contato, na superfície dos balões e fixadas por rebites no isolamento como demonstrado na Figura 6.

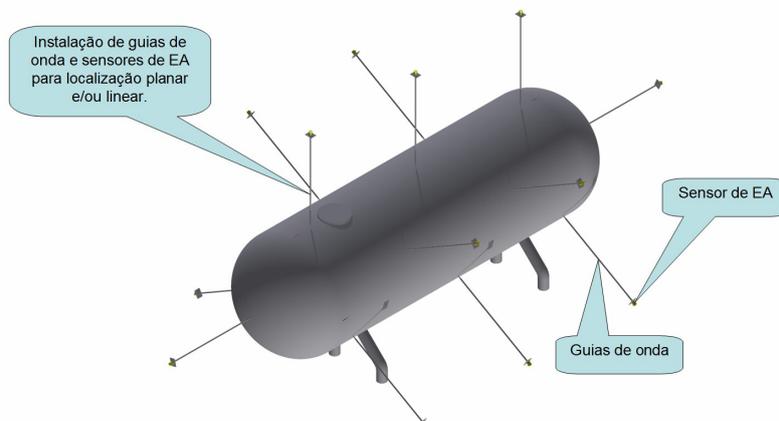


FIGURA 6 – Sensores de EA nos vasos de pressão.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 7, pode-se observar a instalação de uma das guias de onda com sensor no tanço do balão de alta pressão.

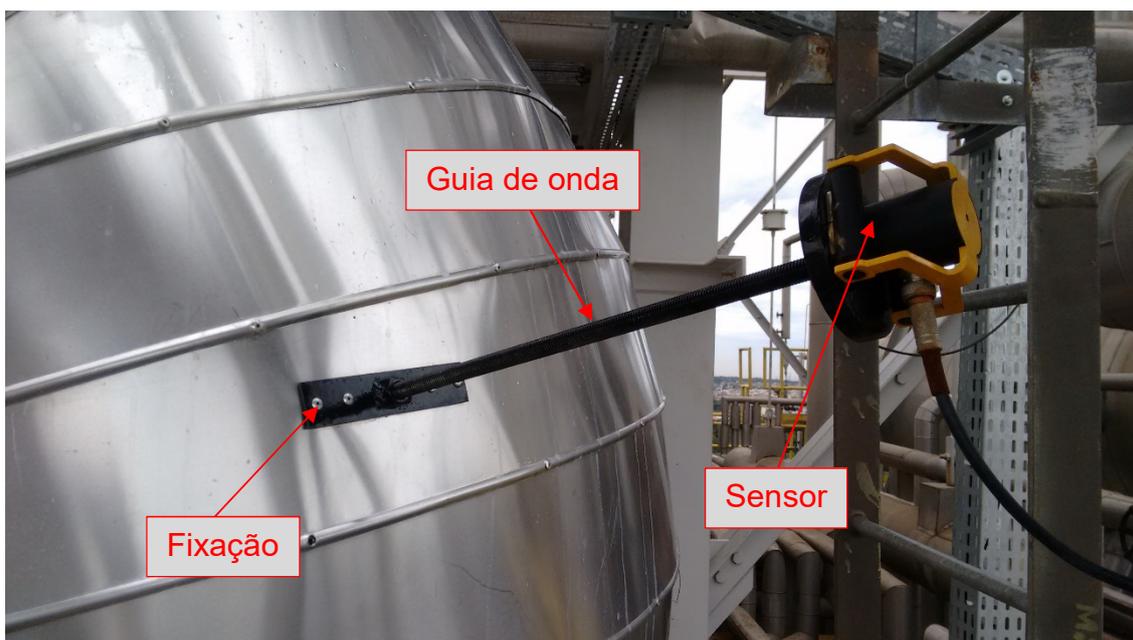


FIGURA 7 – Sensor instalado com a guia de onda no tanço.

A Figura 8 apresenta a disposição tridimensional dos sensores em um dos balões de tal forma que haja um bom desempenho do monitoramento e localização de fontes ativas no ativo monitorado para que caso exista alguma descontinuidade presente ela seja avaliada e a equipe de O&M possa tomar uma decisão assertiva.

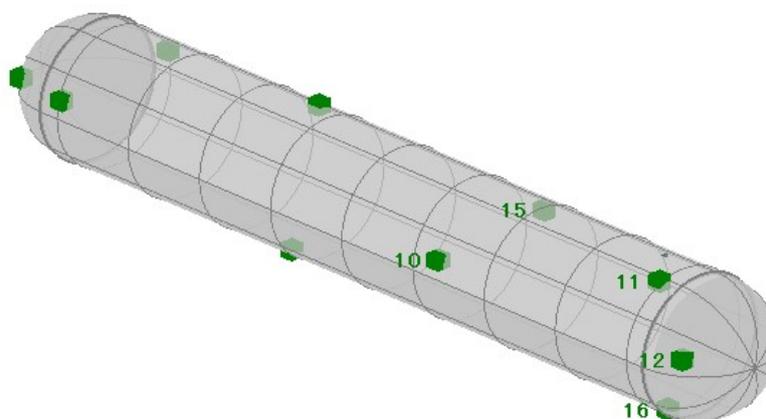


FIGURA 8 – Disposição tridimensional dos sensores no balão de alta pressão.

## 5.0 – CONCLUSÃO

As características dos equipamentos, assim como suas limitações e aplicações foram examinadas e consideradas de modo a atender as especificações técnicas do sistema de monitoramento por emissão acústica proposto pelo projeto de P&D. Após a aquisição dos equipamentos, foi realizada a montagem e instalação da instrumentação bem como dos softwares e driver para seu funcionamento.

Após a instalação dos sensores nos balões, a caldeira entrou em funcionamento apenas uma vez e com carga inferior à de trabalho, e apesar de não atingido sua pressão de trabalho por um longo período de tempo foi possível verificar regiões ativas no monitoramento por EA. Ou seja, o programa de acompanhamento indicou a localização da área ativa no tampo leste do balão de alta pressão. Após o final dos testes a usina não foi entrou em operação, porem os resultados preliminares são promissores uma vez que, não se tem o histórico da atividade dessa região.

## 2.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CAMPOS, M, A. *Estudo das Instalações e Operação de Caldeira e Vasos de Pressão de uma Instituição Hospitalar, sob Análise da NR 13*, 2011.
- (2) CAVALINI Jr, A, A. *Monitoramento de Integridade Estrutural de Sistemas Mecânicos via Observador de Estado Modal*, 2009.
- (3) FILIPPIN. C.G, BORBA. J, NETO. J. A. R, PIRES. L. M, SIRINO. L, LUZIO. M. A, MOURA. N. C, MORO. P. C, SILVEIRO. V. *Emissão Acústica Conceitos e Aplicações*, LACTEC, 2017.
- (4) GROSSE, C. U, OHTSU, M. *Acoustic Emission Testing*, 2008.
- (5) HALL, S. R.; CONQUEST T. J. *The total data integrity initiative structural health monitoring, the next generation*, 1999.
- (6) HARRIS.D.O; DUNEGAN H.L. *Continuous Monitoring of Fatigue-crack growth by acoustic-emission techniques*, 1974
- (7) INASAKI, I. *Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes*, 1998.
- (8) LUNDGAARD, L, E. HANSEN, W. *Acoustic method for quality control and in-service periodic monitoring of medium voltage cable terminations*, 1998.
- (9) RODRIGUES, R, S. *Aplicação de Técnicas de Emissão Acústica na Localização de Dano em Estruturas*, 2012.
- (10) TELLES, P, C, S. *Vasos de Pressão*, 1996.
- (11) TIBONI, G, B. *Aplicação da Técnica de Emissão Acústica em Ensaio de Desgaste Erosivo*, 2011.
- (12) UEGA. *Responsabilidade Socioambiental*. Disponível em: <http://www.uega.com.br/responsabilidade-socioambiental/>. Acesso em: 20 de Abr. de 2019.
- (13) Norma Regulamentadora n° 13 do Ministério do Trabalho - "NR-13 CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO E TUBULAÇÕES", Portaria MTE n.º 1.082, de 18 de Dezembro de 2018.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Autor principal: Leonardo Meneghini Pires  
Formação acadêmica: Engenharia Mecânica  
Pesquisador LACTEC



**XXV SNPTEE**  
**SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E**  
**TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

4797  
GGT/17

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

Eduardo Massashi Yamao  
Mestrado em Engenharia Elétrica (Curitiba, 2016)  
Pesquisador no Lactec

Felipe Taborda Ribas Tovar  
Especialização em Engenharia de Software (Curitiba, 2017)  
Pesquisador no Lactec

Leonardo Sirino  
Engenheiro Mecânico (Curitiba, 2019)  
Pesquisador no Lactec

Samuel Cavalli Kluthcovsky  
Graduando em Engenharia Mecânica (Curitiba, 2019)  
Estagiário no Lactec

Paolo Romulo Marcacuzco Cuevas  
Graduando em Engenharia Mecânica (Curitiba, 2019)  
Estagiário no Lactec

Paulo Cristiano Moro  
Mestrado em Desenvolvimento de Produto (Curitiba, 2018)  
Pesquisador no Lactec

Carlo Giuseppe Filippin  
Mestrado em Engenharia Mecânica (Florianópolis, 1992)  
Gerente da Divisão de Sistemas Mecânicos

Nestor Carlos de Moura  
Engenharia Mecânica (São Paulo, 1990)  
Consultor nível 3 em Emissão Acústica

Marco A. Luzio  
Mestrado em Física (São Paulo, 2017)  
Consultor nível 3 em Emissão Acústica

Lourival Silva Junior  
Engenheiro Mecânico (Curitiba, 2012)  
Engenheiro na UEGA

Cintia de Carvalho Toledo  
Especialização em Sistemas de Energia Elétrica (Florianópolis, 2006)  
Diretora Técnica UEGA