



### Grupo de Estudo de Geração Térmica-GGT

#### Cabeça de série de sistema de monitoramento sem fio de vibração, temperatura e consumo de energia em termoelétricas

**FABRIZIO LEAL FREITAS(1); TIAGO KAORU MATSUO(1); BRUNO DE BORBA(1); CELSO SOUZA(1);  
GUSTAVO LEÃO MOURÃO(1); MARCIO AMERICO(2); AUGUSTO TIETZ(2); FABIO MONTEIRO STEINER(3);  
RAFAEL BARTHOLOMEU BERNARDO CARVALHO(3);  
AQTech(1);JE(2);EDF NF(3);**

#### RESUMO

A monitoração de ativos no setor de geração de energia elétrica ganha cada vez mais importância em função do aumento da segurança e redução de custos de manutenção. Este informe técnico descreve o desenvolvimento de um sistema de monitoração de vibrações, temperatura e consumo de energia utilizando tecnologia *wireless*. Os principais desafios e arquitetura do sistema são descritos, bem como testes em campo realizados na UTE Norte Fluminense da EDF. A conclusão mostra que este sistema é adequado para as condições específicas encontradas em usinas térmicas.

#### PALAVRAS-CHAVE

Eficiência Energética, Monitoramento de Ativos, Plantas Térmicas, Comunicação sem fio, *Smartmesh*

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

A importância das usinas térmicas para o Sistema Elétrico Brasileiro é altamente reconhecida devido a suas características peculiares de alta flexibilidade operativa, não dependendo de condições climáticas como chuva, sol ou vento. As plantas de usinas térmicas podem operar 24 horas por dia e quando a demanda por potência aumenta, aumentam as necessidades de segurança e redução de custo de operação e manutenção. Este tipo de planta possui muitos equipamentos auxiliares (ativos) como bombas, ventiladores e motores que operam em alta rotação. Para garantir sua operação segura e confiável, bem como prover diagnósticos e prognósticos voltados à manutenção, seu estado de vibração e temperatura devem ser monitorados. Medições de corrente também são importantes para a melhoria da eficiência energética. Outra característica própria das plantas térmicas é a localização dispersa dos ativos, logo a forma tradicional de monitoramento *on-line* com conexões utilizando cabos blindados não é adequada pois possui custo elevado e difícil instalação. Para tentar resolver este problema as plantas térmicas utilizam medições itinerantes, através do uso de equipamentos portáteis, mas esta solução não garante precisão, confiabilidade e segurança necessárias, depende de intervenção humana, gerando amostras de dados pontuais, que podem não ser suficientes para a análise do estado do ativo, além de apresentar um custo elevado pois normalmente são contratados serviços de terceiros para realizar estas medições periódicas.

Este informe técnico é parte integrante do projeto PD-00678-0217/2017 do programa ANEEL, intitulado 'Cabeça de Série e aperfeiçoamento do Sistema de Monitoramento de Baixo Custo Desenvolvido nos Projetos PD-0678-0410/2010 E PD-0678-0213/2013 ZIGBEE 3'.

Os futuros desenvolvimentos do projeto, incluindo novas aplicações, também são delineados e discutidos. A evolução para as etapas da cadeia de inovação de P&D ANEEL de "Lote pioneiro" e "Inserção no mercado" aproximam a tecnologia do mercado para contribuir para a manutenção preditiva e eficiência energética em plantas termoelétricas.

A expansão da aplicabilidade em outros mercados como a indústria cerâmica, aumenta o potencial impacto da tecnologia no setor industrial como alternativa de menor custo frente aos produtos importados existentes no mercado.

## 2.0 - PROJETO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO WIRELESS

### 2.1 Desafios

Este projeto apresentou uma série de desafios tecnológicos, dentre os quais podemos destacar:

- Encontrar uma tecnologia *wireless* que fosse capaz de prover alcance compatível, alta robustez a ambientes agressivos, baixo consumo de bateria e capacidade de criptografia de dados;
- Prover capacidade de processamento local nos módulos de medição, pois devido à baixa taxa de transferência *wireless*, vários processamentos devem ser realizados localmente à medição, como cálculo de espectro de frequências FFT (*Fast Fourier Transform*), com o objetivo de reduzir a quantidade de informações transmitidas via *wireless*;
- Utilizar sensores de vibração com faixa de medição até 10kHz, devido à alta rotação dos ativos de plantas térmicas, visando manter o mesmo desempenho de equipamentos portáteis tipicamente utilizados;
- Aumentar o tempo para troca de baterias ao máximo, o que implica o uso de sistemas eletrônicos de baixo consumo e baterias com alta capacidade;
- Manter o custo baixo, para que a solução seja economicamente mais vantajosa em comparação com as soluções atuais de mercado.

### 2.2 Tecnologia

As principais tecnologias selecionadas para que os desafios acima pudessem ser ultrapassados estão descritas a seguir.

#### 2.2.1 Tecnologia de comunicação sem fio

A partir do estudo de diversas tecnologias, optou-se pela *SmartMesh* [1], fornecida pela empresa Analog Devices. Os produtos desenvolvidos com esta tecnologia são considerados como os que apresentam menor consumo de energia e os mais confiáveis para redes de sensores *wireless*. Já são utilizados em mais de 76000 redes sem fio em 120 países. Além disso a tecnologia é focada em ambientes industriais, onde existem muitas fontes de interferência. Os módulos *SmartMesh* possuem um módulo de rádio e um processador de 32 bits ARM-Cortex M3, encapsulados no mesmo circuito integrado. A Figura 1 apresenta a estrutura descrita.

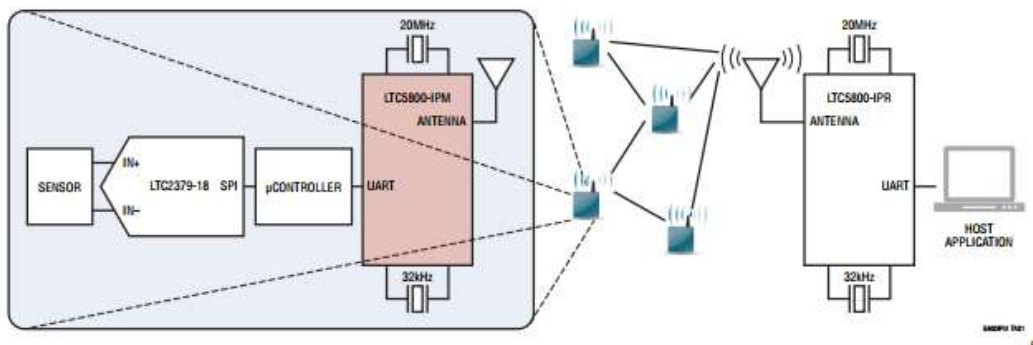


Figura 1. Aplicação típica da tecnologia SmartMesh.

#### 2.2.2 Tecnologia de medição de vibração

A ideia inicial seria utilizar sensores de vibração com tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Estes sensores apresentam baixo consumo de energia e banda de frequência adequada a esta aplicação. A Figura 2 apresenta os sensores descritos.

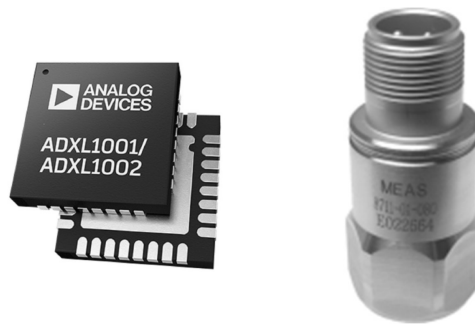


Figura 2. Sensor de vibração MEMS (esquerda) e IEPE (direita).

Porém o que se verificou na prática foi uma grande dificuldade no uso destes sensores devido ao empacotamento mecânico, que causou uma redução na máxima frequência mensurável em razão da redução de sua frequência de ressonância.

Optou-se então pelo uso de sensores de vibração piezoelétricos IEPE [2]. Estes sensores são os mesmos utilizados nos sistemas *on-line* tradicionais com fio ou nos equipamentos portáteis para medições itinerantes. Possuem uma ótima aceitação perante o setor elétrico, tipicamente já vem com certificado de calibração de fábrica e não apresentam os desafios do empacotamento mecânico encontrado nos MEMS. Por outro lado apresentam um consumo de energia maior, o que exigiu um hardware capaz de desligá-lo completamente quando não estiver sendo utilizado.

### 2.2.3 Alimentação dos módulos

Espera-se que os elementos instalados em campo e alimentados por bateria possam ter autonomia de alguns anos. Para isto foram implementadas chaves eletrônicas (utilizando transistores MOSFET) para desligar partes dos circuitos quando não estão em uso. Técnicas de *sleep* (adormecimento) por software dos circuitos também foram implementadas e finalmente utilizou-se baterias de lítio [3], com aproximadamente 3.500 mAh de capacidade e tamanho AA, o que facilita a sua eventual substituição.

### 2.2.4 Processamento.

No sensor de corrente e repetidor, o processador ARM-Cortex M3 contido no módulo *SmartMesh* é suficiente para todo o processamento. No sensor de vibração, por outro lado, é necessário digitalizar os dados a taxa de 9kHz e calcular FFT localmente. Neste caso optou-se por utilizar outro processador, operando em conjunto com o módulo *SmartMesh*, o ADuCM3029 - também ARM-Cortex M3 de baixo consumo, mas com maior frequência de operação e maior quantidade de memória.

O *Gateway*, por exigir uma capacidade de processamento ainda maior e por não ser alimentado por baterias, foi concebido utilizando-se um FPGA (Field Programmable Gate Array) adequado para ambientes industriais. O FPGA permite a configuração de um processador *soft-core* que executa o Sistema Operacional Linux embarcado.

### 2.2.5 Tecnologia de Medição de Corrente

Como a medição de corrente deve ser não intrusiva e não há a necessidade de medição de corrente contínua, optou-se neste caso pelo uso de garras de corrente (*current clamps*), que transformam a corrente numa tensão a ser medida pelo conversor ADC

## 2.3 Descrição do sistema de monitoramento sem fio

A solução é composta por *gateways* e sensores. Baseia-se na concepção mestre-escravo, onde os sensores monitoraram seus respectivos sinais, distribuídos em diversos pontos da instalação, sendo esses dados transmitidos para o *gateway*, que concentra estes dados e os disponibiliza para o sistema supervisor da usina. O repetidor, estabelece a comunicação entre os demais sensores e o *gateway* em situações em que a comunicação entre mestre-escravo se torna mais difícil, em virtude da presença de obstáculos, distância ou de alguma característica específica da instalação.

Não há necessidade de um microcomputador dedicado para rodar o programa do *SmartMesh*. A parte relativa ao processamento do software é executada no próprio *gateway*, que disponibiliza os dados em protocolos de comunicação. A Figura 3 apresenta o sistema descrito.

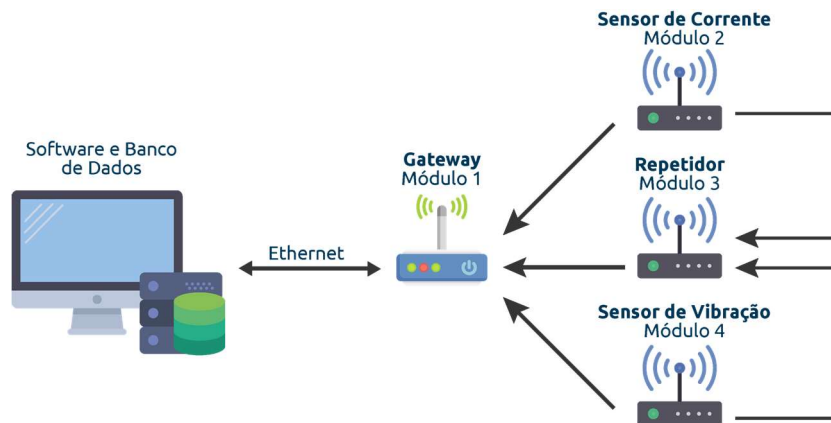


Figura 3. Visão Geral do Sistema de monitoramento sem fio.

### 2.3.1 Módulo Sensor de Vibração

O sensor de vibração é alimentado por baterias e contém externamente um cabo para o sensor IEPE e um cabo para um sensor de temperatura externa (PT100). A antena é embutida dentro do gabinete plástico com grau de proteção IP67 (Figura 4).

### 2.3.2 Módulo Sensor de Corrente

O sensor de corrente é também alimentado por bateria e possui externamente 4 garras de corrente [4]. As garras de corrente são especificadas de acordo com o consumo da máquina a ser monitorada, iniciando em dezenas de amperes e podendo chegar a centenas. A Figura 5 apresenta o módulo de medição de corrente.

### 2.3.3 Módulo Repetidor

O repetidor igualmente é alimentado por bateria, possui IP67, antena embutida e possui o mesmo gabinete do sensor de corrente. A função do repetidor é apenas servir de apoio para formar a rede *mesh*. Principalmente em locais onde haja problemas de alcance ou obstáculo. A arquitetura é a mesma de um sensor de corrente, porém sem os circuitos de aquisição de dados.

### 2.3.4 Gateway (coordenador)

O *Gateway*, diferentemente dos sensores, não necessita grau de proteção de IP67. É alimentado externamente por uma fonte de 5V. Possui antena externa e interface ethernet. A Figura 6 apresenta o modelo do *Gateway* desenvolvido.



Figura 4. Módulo de Vibração.



Figura 5. Módulo de Corrente (sem as garras).



Figura 6. Gateway.

### 2.3.5 Aplicativos de software

Dois aplicativos de software foram desenvolvidos: um para realizar a configuração do sistema e a coleta dos registros armazenados no gateway para uma base de dados PostgreSQL e outro para visualizar estes registros já armazenados na base de dados PostgreSQL. As configurações incluem a taxa de realização de registros, o número de linhas da FFT, e outras configurações.

Toda a parametrização dos sensores e repetidores é realizada através do Gateway, que por sua vez recebe comandos via protocolo do software de configuração e coleta de registros. Este protocolo é um protocolo de aplicação (7ª camada do modelo OSI) e é executado sobre uma rede TCP/IP.

O aplicativo de visualização de registros adquire os dados armazenados na base PostgreSQL e disponibiliza na forma de gráficos de espectro de frequência e tendência (histórico). A Figura 7 ilustra este software.

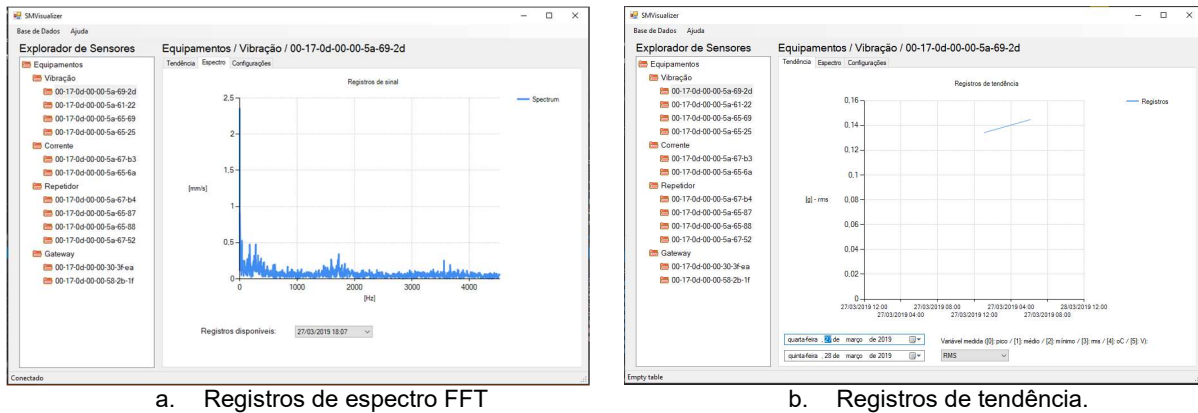


Figura 7. Software de visualização dos dados.

O espectro é obtido a partir do sinal coletado no domínio do tempo com a aplicação do algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) [5]. Os registros de sinais são obtidos mediante a obtenção das demais variáveis analógicas, como temperatura e tensão, assim como o valor RMS (*Root Mean Square* – Valor Quadrático Médio) do espectro de frequência a partir de uma taxa previamente definida pelo usuário. Essa taxa é usualmente configurada em intervalos de 10 minutos ou mais.

### 3.0 - AVALIAÇÃO E TESTES

#### 3.1 Avaliação em laboratório

A aferição das medições do sistema foi realizada de maneira que foram comparadas as medições associadas ao sensor de vibração com um instrumento comercial previamente calibrado. Os equipamentos utilizados no processo de aferição foram: *Shaker*: TMS The Modal Shop, Modelo: 9100D, S/N: 1101 Coletor de Dados de Vibração: COMMTEST, Modelo: VB5, S/N: 45583 Sensor de Vibração: Acelerômetro iOMvib, Modelo: HS-1001005001, S/N: 178415 Módulo de Aquisição AQTech: Sensor de vibração ZIGBEE3 Módulo concentrador de registros AQTech: Gateway ZIGBEE3.

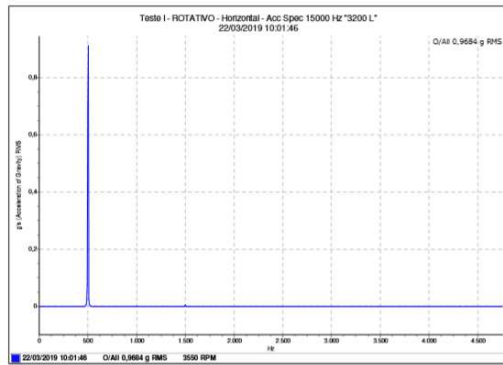
A validação foi realizada com o coletor de dados de vibração COMMTEST - VB7 e um acelerômetro de 100mV/g conectado ao *Shaker*, onde foram aplicadas amplitudes de 1.0G RMS nas seguintes faixas de frequências: 60hz, 120hz, 240hz, 500hz, 550hz, 600hz, 2000hz, 3000hz e 4000hz.

Para a coleta dos dados, o módulo centralizador (ou *gateway*), possui um software embarcado com a finalidade de receber os dados transmitidos pela rede de sensores. A coleta é realizada de maneira periódica, previamente definida pelo usuário, e as medições armazenadas em base de dados local SQLite.

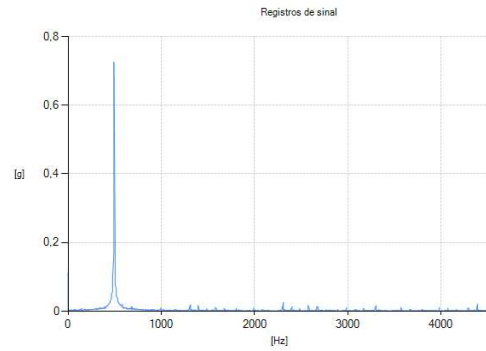
Posteriormente, os sinais transmitidos pelo sensor de vibração foram armazenados em uma base de dados local por um software de coleta. Através do software de coleta é possível verificar os registros existentes na base de dados do dispositivo embarcado além de oferecer possibilidade de transferir essas informações para uma base de dados local do tipo PostgreSQL. Finalmente, a partir do *software* é possível configurar a taxa de aquisição dos dados pelo *gateway*.

Os registros coletados são visualizados por intermédio de um *software* de visualização. O *software* adquire os dados armazenados na base PostgreSQL, permitindo a visualização dos registros armazenados na base. Os registros são formados por medições de espectro de sinais (FFT) e de tendência em valores RMS calculados a cada 10 minutos.

A Figura 8 apresenta os espectros associados às medições dos dois sensores para as frequências de 500Hz e 3.000Hz.

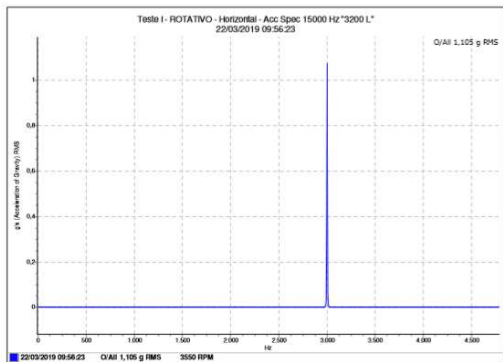


a. instrumento comercial – 500Hz/1g

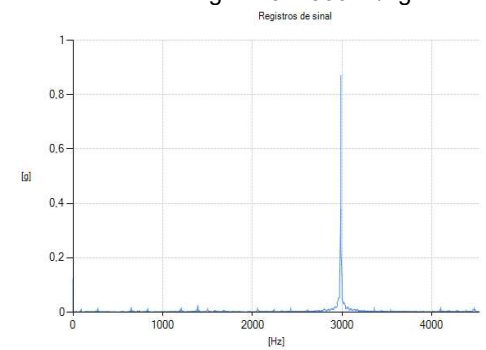


Registros disponíveis: 22/03/2019 10:30

b. Zigbee 3 – 500Hz/1g



c. instrumento comercial – 3.000Hz/1g



Registros disponíveis: 22/03/2019 10:50

d. Zigbee 3 – 3.000Hz/1g

Figura 8. Medições associadas aos dois sensores para 500Hz e 3.000Hz.

Com o objetivo de comparar o erro entre as medições associadas à cada sensor, em termos do valor RMS, foram calculados os erros absolutos e relativos entre as medições realizadas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Medições e erros associados às medições do módulo desenvolvido e instrumento comercial.

Aplicado		Medido		Erro %		
Frequência oscilação	Amplitude (Gs RMS)	COMMTTEST (Gs RMS)	ZIGBEE3 (Gs RMS)	COMMTTEST	ZIGBEE3	Relativo
60	1	0,9696	0,920	3,04	8	4,96
120	1	0,9665	0,924	3,35	7,6	4,25
240	1	0,9657	0,922	3,43	7,8	4,37
500	1	0,9684	0,924	3,16	7,6	4,44
550	1	0,9679	0,921	3,21	7,9	4,69
600	1	0,9692	0,921	3,08	7,9	4,82
2000	1	1,031	0,963	3,1	3,7	6,8
3000	1	1,105	1,022	10,5	2,2	8,3
4000	1	0,8743	0,760	12,57	24	11,43

Verificou-se que a medição realizada pelo ZIGBEE3 apresentou resultados similares e coerentes ao do instrumento comercial, atestando o funcionamento do produto cabeça de série desenvolvido em comparação com uma referência calibrada e confiável.

### 3.2 Instalação e validação em campo

A instalação dos equipamentos em campo na usina EDF Norte Fluminense, situada em Macaé/RJ, foi realizada conforme apresentado na Figura 9. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é indicada a legenda dos módulos de monitoramento instalados na planta.



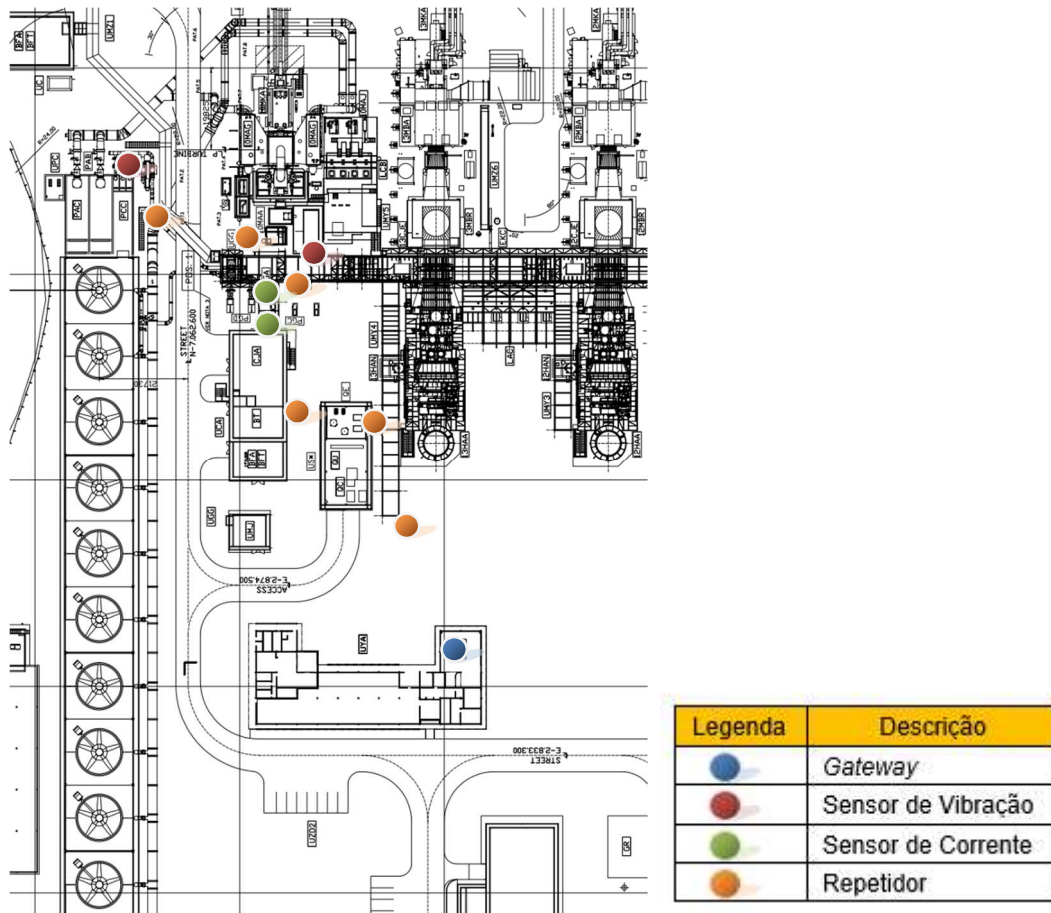


Figura 9. Posição das instalações realizadas na UTE EDF NF.

As instalações em campo relativas à cada equipamento são apresentadas na Figura 10. Os ativos monitorados, PAC e PGC, são motores elétricos. O primeiro tem tensão nominal de 4kV, velocidade de 493 RPM e corrente de 1605 A, enquanto o segundo tem tensão nominal de 440V, velocidade de 1185 RPM e corrente nominal de 220A.



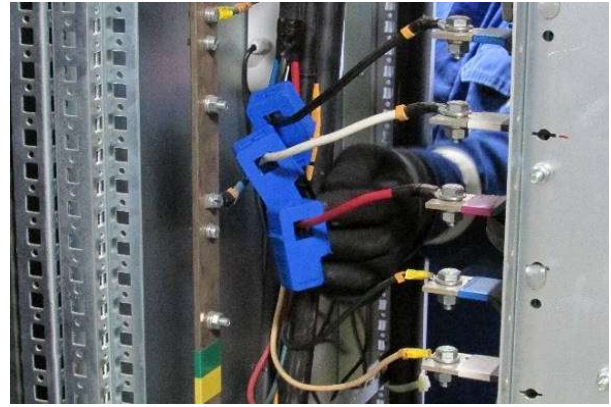
a. Repetidor



b. Vibração PGA



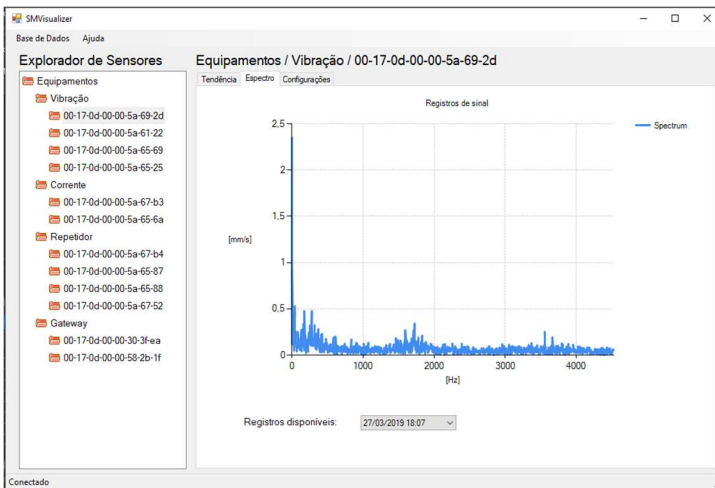
c. Vibração PGC



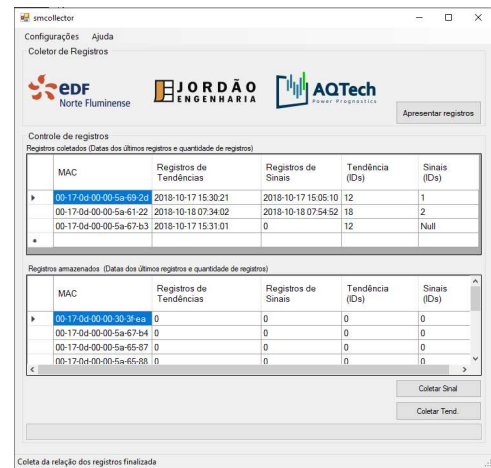
d. Medição de corrente PGA

Figura 10. Instalações realizadas em campo.

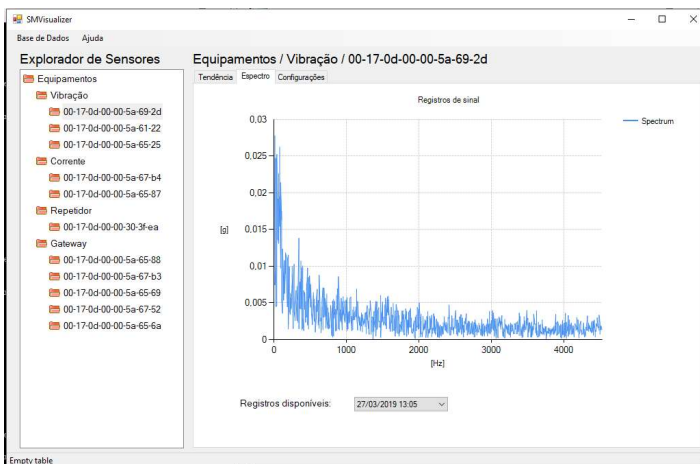
A partir da instalação dos equipamentos foram verificadas as leituras obtidas. Os registros coletados, assim como o espectro em g e em mm/s estão apresentados na Figura 11.



a. Espectro coletado em aceleração [g].



b. Registros.



c. Espectro coletado em velocidade [mm/s].

Figura 11. Espectros de frequência em [g] e [mm/s] associados aos registros coletados.

A partir dos dados adquiridos em campo e com a conclusão da aplicação piloto foi possível atestar que os módulos desenvolvidos funcionam perfeitamente em ambientes de usinas termoelétricas.



#### 4.0 - FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Visando um aprimoramento na aplicação para usinas térmicas bem como ampliar a utilização do sistema em ambientes industriais, pretende-se implementar as seguintes características:

- Possibilidade de instalar 3 sensores IEPE em cada sensor de vibração;
- Aumentar a taxa de amostragem para poder avaliar harmônicos de mais alta ordem;
- Possibilidade de utilizar sensores de vibração MEMS;
- Redução ainda maior de consumo de bateria;
- Fabricação de gabinetes personalizados que facilitem a troca de baterias;
- Opção de alimentação externa para todos os módulos.

#### 5.0 - CONCLUSÃO

Apesar dos grandes desafios encontrados, foi possível criar uma solução que atendesse as necessidades da UTE Norte Fluminense da EDF. Este sistema será uma ferramenta muito importante para a manutenção preventiva e para o acompanhamento do consumo de energia dos ativos desta UTE, trazendo redução de prejuízos por paradas inesperadas.

Os futuros desenvolvimentos vão propiciar uma maior redução de custo e melhora de desempenho, além de aumentar a flexibilidade que será obtida com a possibilidade de alimentação a bateria e externa, o que permitirá inclusive a utilização de painéis solares.

#### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SmartMesh Wireless for Tough Industrial IoT Applications. Analog Devices - SmartMesh. Disponível em: <<https://www.analog.com/en/applications/technology/smartmesh-pavilion-home.html/>>. Acesso em: 20 de abril de 2018.
- (2) Integrated Electronics Piezo-Electric sensor. PCB Piezotronics. Disponível em: <<http://www.pcb.com/Products.aspx?m=603C91>>. Acesso em: 20 de abril de 2018.
- (3) Lithium Batteries. Energizer. Energizer Ultimate Lithium Batteries. Disponível em: <<https://www.energizer.com/batteries/energizer-ultimate-lithium-batteries>>. Acesso em: 20 de abril de 2018.
- (4) Split core current transformer. **YHDC**. Disponível em: <<http://en.yhdc.com/product1311.html?productId=703>>. Acesso em: 20 de abril de 2018.
- (5) Welch, Peter. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. IEEE Transactions on audio and electroacoustics 15.2 (1967): 70-73.

#### 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Fabrizio Leal Freitas (\*) nasceu em São Paulo/SP em 1977. É mestre em Engenharia de Produção pela UFSC (2010), formado em Engenharia de Produção Elétrica (UFSC, 2005) e técnico em eletrônica (SATC, 1994). Desde 2003 trabalha com gestão de desenvolvimento de produtos inovadores em empresas de tecnologia, especializado no projeto de sistemas de monitoramento e diagnóstico para o setor de energia elétrica. Atua como pesquisador e principalmente coordenador em projetos de Pesquisa & Desenvolvimento financiados no programa ANEEL em cooperação com grandes concessionárias do setor elétrico brasileiro. Atualmente é Diretor de Inovação da AQTech Power Prognostics, sediada em Florianópolis, e participa do Comitê de Estudo A1 – Máquinas Rotativas do Cigré Brasil.