



## **Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH**

### **Desafio de operação de unidades geradoras com restrição hídrica em uma grande usina.**

**Jeferson Inácio Lopes; Eric Rodrigo de Moraes; Dalton Rocha Amaral; Robson de Carvalho Brito;  
Aender de Paula Moura; Luis Fernando a Prehl Jr; Cristiano de Melo Nascimento;  
Marcos Antonio Cirino; Flávio Marcos Alves Juste**

**CEMIG GT;**

#### RESUMO

Este trabalho apresenta a experiência da Cemig GT na operação das Unidades Geradoras da Usina Hidrelétrica de Três Marias com o reservatório em níveis de armazenamento inferiores à queda nominal de projeto e com o desafio de manter a integridade física dos hidrogeradores sob condições dinâmicas adversas para qual foram projetados.

Nesse contexto, as opções de análise, os resultados do estudo, os ensaios e as respostas de engenharia para condição atípica de operação serão apresentados no trabalho, além de algumas questões relacionadas com as políticas públicas do setor, negociadas entre a Cemig GT e os órgãos reguladores.

#### PALAVRAS-CHAVE

Manutenção, operação, limite operativo, restrição hídrica, ensaios dinâmicos.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tivemos no Brasil e em especial em Minas Gerais períodos chuvosos desfavoráveis e abaixo das médias históricas registradas. Esta condição hídrica levou o ONS a explorar mais os reservatórios e em algumas usinas foram registrados níveis críticos em 2014 até então não vivenciados.

No contexto acima, será apresentada a experiência da Cemig GT na operação inédita das Unidades Geradoras da Usina Hidrelétrica de Três Marias com baixo nível de água, tendo como grande desafio manter a integridade física das UG's sob condições dinâmicas e estáticas totalmente adversas.

A Usina Hidrelétrica de Três Marias, Figura 1, entrou em operação em julho de 1962, possui 6 máquinas com potência nominal de 66 MW e total de 396 MW. O grande problema é que nesta usina não existe válvula de fundo que poderia manter o curso natural do rio e permitir a vazão sanitária no período de seca, caso o reservatório atingisse valores abaixo do nível mínimo para operação. Nesse contexto, as opções de análise, os resultados do estudo, os ensaios e as respostas de engenharia e manutenção para condição atípica de operação serão apresentados no trabalho. Além das questões técnicas, foram abordadas questões políticas e judiciais e realizadas várias reuniões de negociações entre a CEMIG GT, ANA, ONS, CODEVASP, Comitê de Bacias e prefeituras de municípios ribeirinhos e apresentações para o Ministério de Minas e Energia.

A Figura 2 mostra a estrutura de controle de nível do reservatório, com nível de água abaixo da cota mínima de vertimento.



FIGURA 1 – Usina de Três Marias – Bacia do Rio São Francisco.



FIGURA 2 – Nível crítico do reservatório. Vertedouro todo exposto.

Serão apresentados os resultados do estudo e as respostas para os seguintes fatores e questões que objetivam:

- Minimizar a geração e conseqüentemente a vazão.  
Como operar as UG's até o limite do volume útil?
- Operar em nível abaixo do projeto das máquinas.  
Como será o comportamento dinâmico destas máquinas?
- Operar as UG's na condição "a vazio" (speed no load).  
Sabe-se que é prejudicial. Compensaria? É viável correr o risco? Qual o impacto submetido às UG's?
- Operar as UG's de forma estática – Máquina parada (no speed).

Qual posição de abertura do distribuidor para máquina não rodar? As vazões ficariam adequadas à necessidade? Quais os efeitos hidráulicos para as UG's?

- Utilizar da vazão de água dos sistemas de refrigeração, das válvulas de equalização do conduto e das tubulações de dreno dos condutos (sistemas periféricos).  
As vazões seriam adequadas?
- Utilizar das estruturas de expansão da usina (UG07 e UG08).

Manobrar comportas, trocar cabos, utilizar mergulhadores. A estrutura civil suportaria?

Cenário desafiador para uma usina antiga:

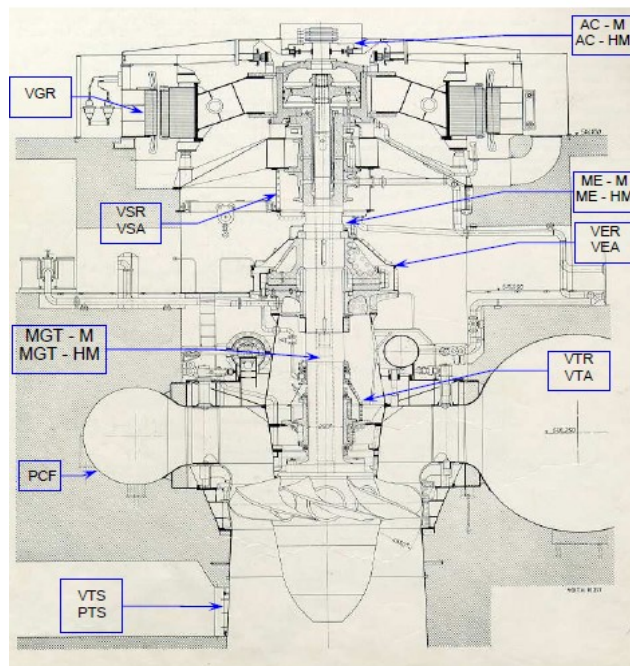
- ▶ Ausência de válvula de fundo;
- ▶ Falta de válvula (s) dispersora (s) (ou extravasores);
- ▶ Ausência de escada de peixes;
- ▶ Vertedouro já sem água na soleira, Figura 2;
- ▶ Manobrar os mecanismos das comportas das UG07 e UG08;
- ▶ Limitação operativa na condição "a vazão";
- ▶ Limitação operativa na condição de máquina parada.

## 2.0 - METODOLOGIA

No estudo foram utilizadas várias técnicas de manutenção, bem como experiência dos profissionais de engenharia de manutenção e operação para conseguir vencer o desafio de preparar para operar a usina "sem água", mantendo o curso natural do rio para permitir a vazão sanitária no período de seca. O reservatório da usina de Três Marias atingiu o mínimo de 2,6 % em 2014 e continuava caindo. Serão apresentadas no trabalho as ações externas tomadas para convencer as autoridades e agências em reduzir a vazão defluente para evitar que o reservatório atingisse o volume útil de 0%. Além das questões técnicas, foram abordadas questões políticas e judiciais e realizadas várias reuniões de negociações entre a Cemig GT, ANA, ONS, CODEVASP, Comitê de Bacias e prefeituras de municípios ribeirinhos e apresentações para o Ministério de Minas e Energia.

### 2.1 Grandezas monitoradas

Vibração radial em mancais de guia;  
Vibração axial e radial no mancal de escora;  
Vibração na carcaça do gerador;  
Vibração no tubo de sucção;  
Oscilação de pressão na sucção;  
Oscilação de pressão na caixa espiral;  
Vibração na tampa da turbina;  
Oscilação de eixo nos mancais;  
Temperaturas dos mancais;  
Ruído na sucção;  
Formação de vórtices na tomada d'água;  
Vibração absoluta no eixo parado;  
Vazão real em cada situação.



## 2.2 Avaliação "on-line" da faixa operativa

Implementação de um sistema de monitoramento completo e provisório;  
 Aferição e definição de novos limites de operação das unidades geradoras em cada condição de queda;  
 Adequação da faixa operativa das UGs em função do deplecionamento do reservatório;  
 Redução gradativa do limite operativo mínimo possibilitando flexibilização da vazão defluente.

## 2.3 Teste de fluxo com máquina parada

Verificar a máxima abertura do distribuidor sem risco para a unidade geradora e sem provocar giro do rotor, com medição precisa da vazão.

## 2.4 Teste de fluxo com máquina a vazio

Ensaio de operação a vazio em rotação nominal, com medição precisa da vazão.

Em referência ao item 2.2 a Figura 3 demonstra a curva da colina de projeto que não previa a situação de reservatório com queda bruta inferior a 32 metros.

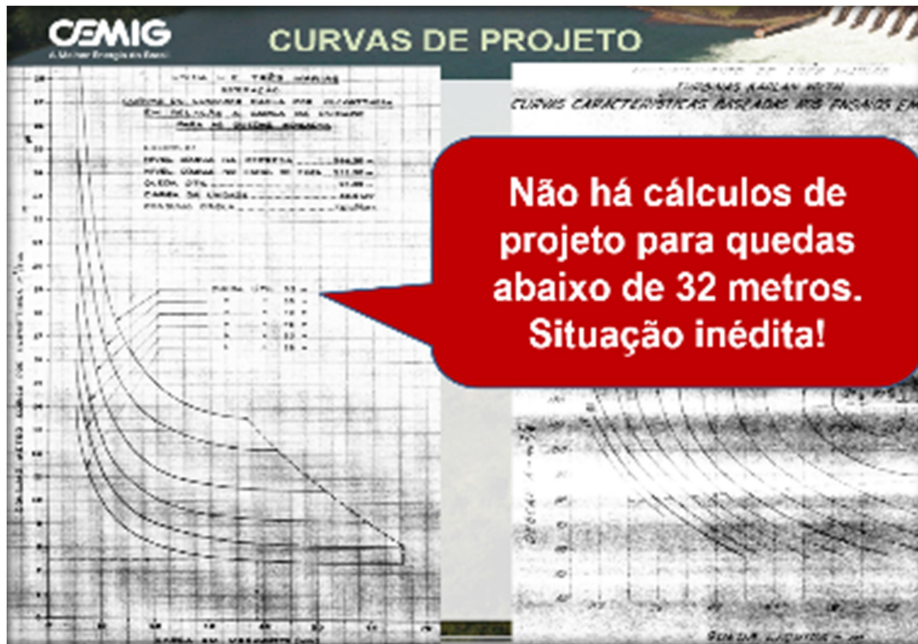


FIGURA 3 - Curva da Colina.

### 3.0 - RESULTADOS

Foram realizados durante os anos de 2013 a 2015 diversos ensaios especiais e inéditos pelas equipes de Engenharia, Planejamento Energético, Manutenção e Operação da CEMIG GT. Segue abaixo um resumo e resultados dos ensaios.

#### 3.1 Deslocamento axial de eixo

Ocorreu aumento do deslocamento axial do eixo nas condições de 16° e 32° e a unidade iniciou processo de giro com 10% e 6% de abertura do distribuidor respectivamente.

#### 3.2 Vibração absoluta no eixo (estático)

Foi observado aumento de vibração absoluta no eixo devido ao aumento da vazão, mas dentro dos limites considerados normais.

#### 3.3 Vibração no tubo de sucção

Ocorreu aumento da vibração na sucção nas condições de 16° e 32° e a unidade iniciou processo de giro com 10% e 6% de abertura do distribuidor respectivamente.

NOTA: Variando a posição da kaplan e distribuidor, a máquina remete a condição proibida devido ao ruído intenso na região da turbina e da sucção.

#### 3.4 Ensaio com giro a vazio – Rotação nominal de 163,64 rpm

##### 3.4.1 Oscilação de pressão no tubo de sucção

A oscilação de pressão no tubo de sucção excede o valor admissível.

##### 3.4.2 Deslocamento axial de eixo

Oscilação axial se comporta conforme histórico para essa condição.

##### 3.4.3 Vibração absoluta no mancal

É observado um aumento de vibração absoluta no mancal, mas dentro dos limites admissíveis.

#### 3.5 Vibração no tubo de sucção

Ocorrem grandes perturbações hidráulicas para esta condição, superando os valores considerados aceitáveis. Historicamente, devido a vibração e ruído intenso na região da turbina e da sucção, ensaios

dinâmicos corroboram que nesta condição as UG's estão na condição operativa classificada como "proibida". Tabela 1 demonstra os valores acima do aceitável para a condição.

TABELA 1- Valores do ensaio estático da unidade geradora 03 com posição da Kaplan em 16° (40%).

USINA DE TRES MARIAS													
ENSAIOS ESTATICOS UNIDADE 03													
20/08/2014													
CONDIÇÃO	VER	VEA	VTR	VTA	VEIX	VPR	VTT	VTS	PTS	OAE	KAPLAN	DISTRIB.	A0
PARADA	0,06	0,12	0,05	0,08	0,05	0,12	0,09	1,28	0,59	59	40%	0%	0 mm
PARADA	0,46	0,63	0,39	0,57	0,45	0,27	0,46	4,22	2,16	90	40%	2%	9 mm
PARADA	2,3	1,55	1,38	1,6	1,76	0,48	1,10	8,36	3,9	176	40%	4%	18 mm
PARADA	2,19	2,96	2,00	2,41	1,92	0,57	1,75	12,32	5,47	289	40%	6%	26 mm
PARADA	2,13	3,40	2,08	3,43	1,76	0,66	1,69	17,88	7,56	308	40%	8%	36 mm
PARADA	2,22	1,90	2,33	3,45	2,06	0,65	1,80	17,99	7,67	353	40%	9,50%	41 mm

Aumento da Vibração no tubo de sucção. Remete a condição proibida da UG em giro.

Aumento da oscilação de pressão no tubo de sucção.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

##### 4.1 Melhor condição com máquina parada

Kaplan em 16° (40% de abertura)

Distribuidor em 4%

Queda de 35 m

Oscilação de pressão no tubo sucção: 62% acima do valor adotado como limite de segurança pela CEMIG;

Vazão medida: 14,35 m³/s para cada UG.

##### 4.2 Condição com máquina a vazio

Rotação nominal

Sem carga

Conjugação Kaplan x distribuidor padrão

Oscilação de pressão no tubo sucção: 77% acima do valor adotado como limite de segurança pela CEMIG;

Vazão medida: 17,40 m³/s para cada UG.

##### 4.3 Vazão dos sistemas periféricos

Há grande dificuldade de estimar vazão total ao colocar os sistemas de refrigeração, válvulas de equalização do conduto e tubulação de dreno do caracol em funcionamento com as máquinas paradas. Há também riscos de danificar os trocadores de calor.

Vazão calculada: ±17 m³/s para cada UG.

##### 4.4 Revisada a limitação operativa

Reduzida a potência mínima de 35 MW para 18 MW e, conseqüentemente, a respectiva vazão.

Vazão medida: de 88 m³/s para 65 m³/s por cada UG.

##### 4.5 Manter o sistema de monitoramento provisório

No caso de ocorrer quedas inferiores ao mínimo já ensaiado (35 m.c.a.), a CEMIG realizaria ensaios on-line sistemáticos nas UG para definir novos limites operativos (L.O.).

##### 4.6 Condições extremas

Os ensaios a vazio e com máquina parada convergiram para a extrapolação de alguns parâmetros dinâmicos, principalmente pressão no tubo de sucção. Novos ensaios deverão ser realizados em quedas ainda menores para subsidiar a decisão de operação nestas condições extraordinárias, Figura 4.

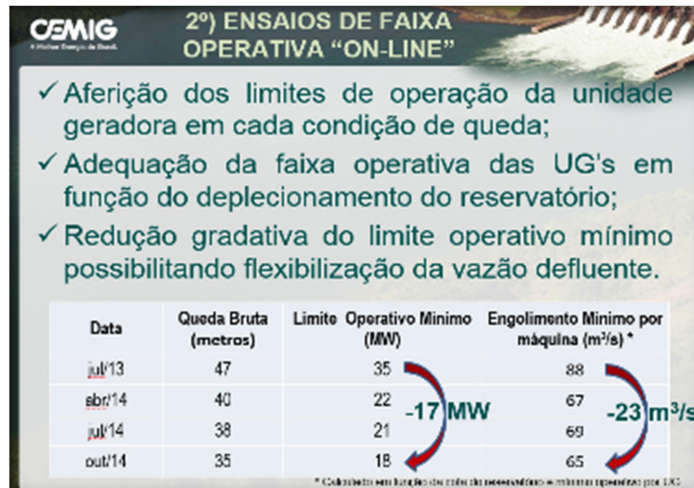


FIGURA 4 – Ensaio de Faixa Operativa em decorrência do deplecionamento do reservatório ao longo do ano.

#### 4.7 Controles adotados atualmente

Os controles adotados após ocorrência da redução do nível do reservatório tornaram possível a recuperação e manutenção dos valores de vazão e geração, sem prejudicar a afluência jusante e menor impacto social ambiental.

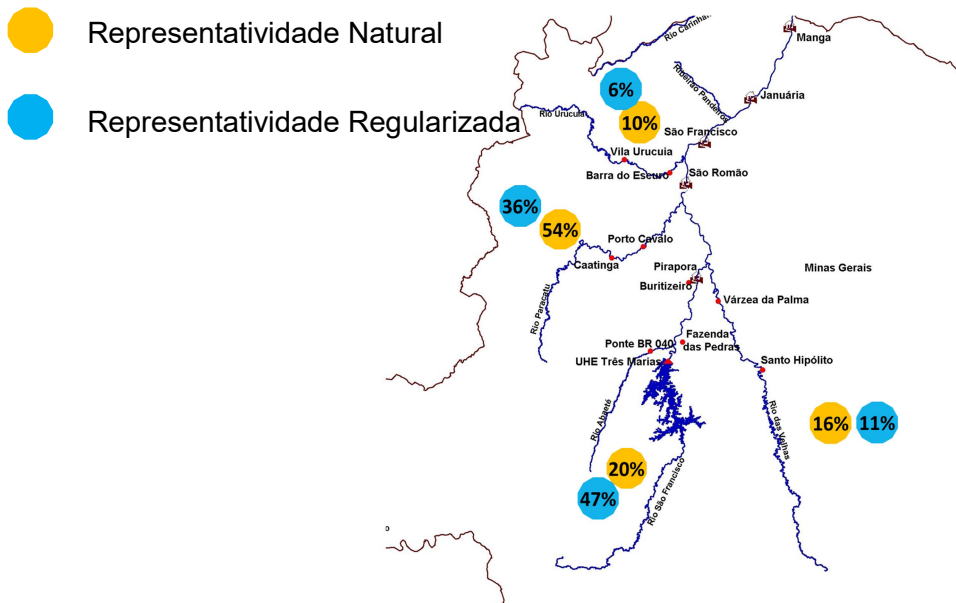


FIGURA 5 – Bacia Hidrográfica da UHE Três Marias

### Operação da UHE Três Marias - Período: 01/Jan/2014 a 05/Mai/2016

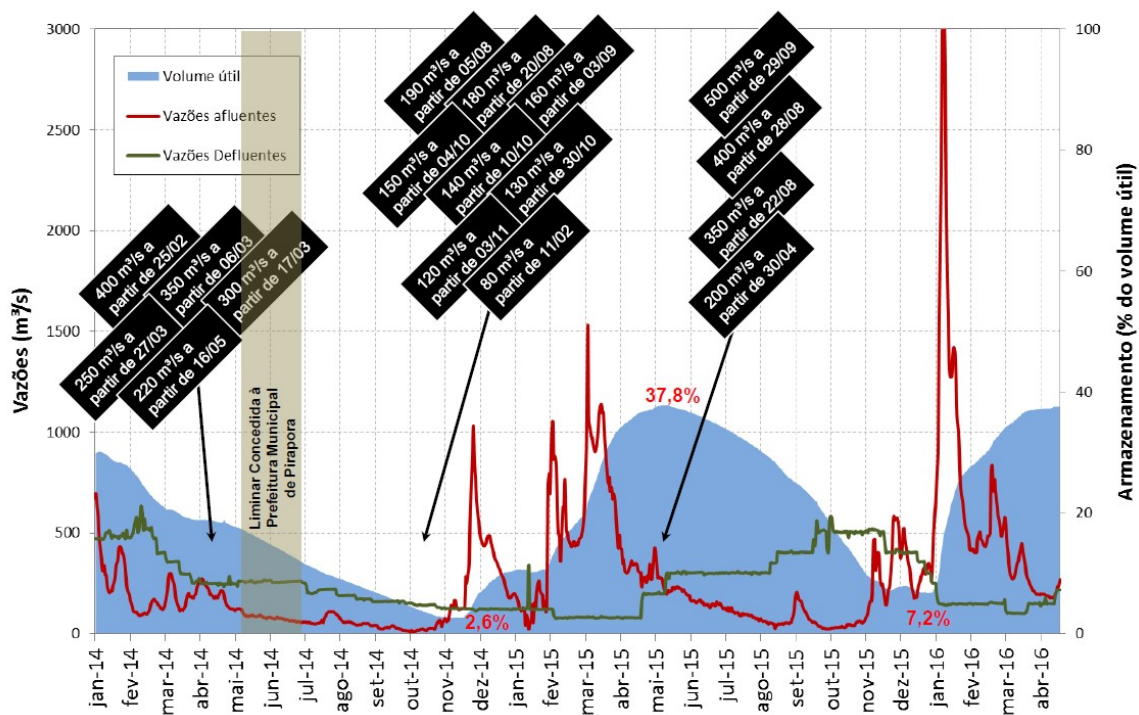


FIGURA 6 – Operação da UHE Três Marias – Período de janeiro de 2014 a maio de 2016

### Operação da UHE Três Marias - Período: Jan/2014 a Abr/2019

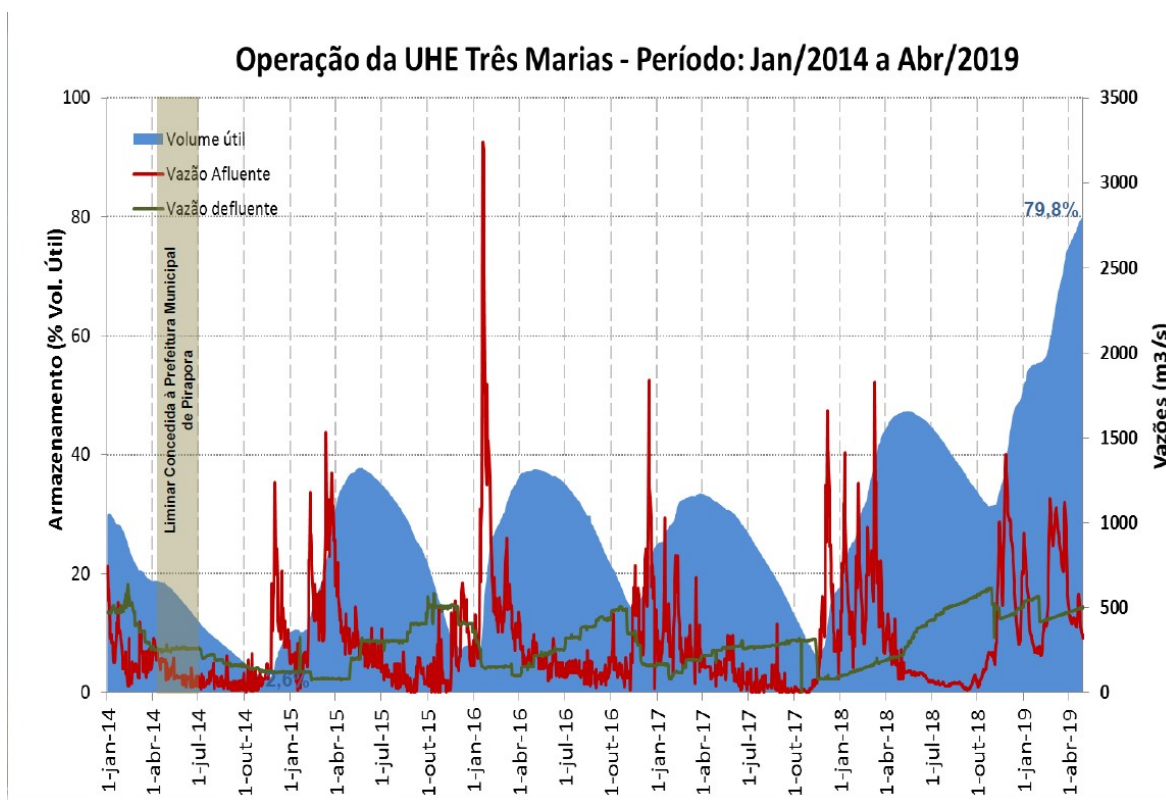


FIGURA 6 – Operação da UHE Três Marias – Período de janeiro de 2014 a abril de 2019



A CEMIG Geração e Transmissão S.A. adquiriu a partir de um pregão em 2018, sistema de monitoramento online para as seis UG's integradas, com software de diagnóstico, banco de dados e coletas dinâmicas para ensaios em tempo real. Este software possibilita visualizar e gerar relatório da situação da Unidade Geradora sem parada de máquina ou isolamento.

As limitações operativas a partir do software implantado passaram a ser dinâmicas com ensaios frequentes de acordo com alteração do nível do reservatório ao longo do ano. Nas Figuras 5 e 6 estão telas do novo sistema implantado em 2018 com operação online.

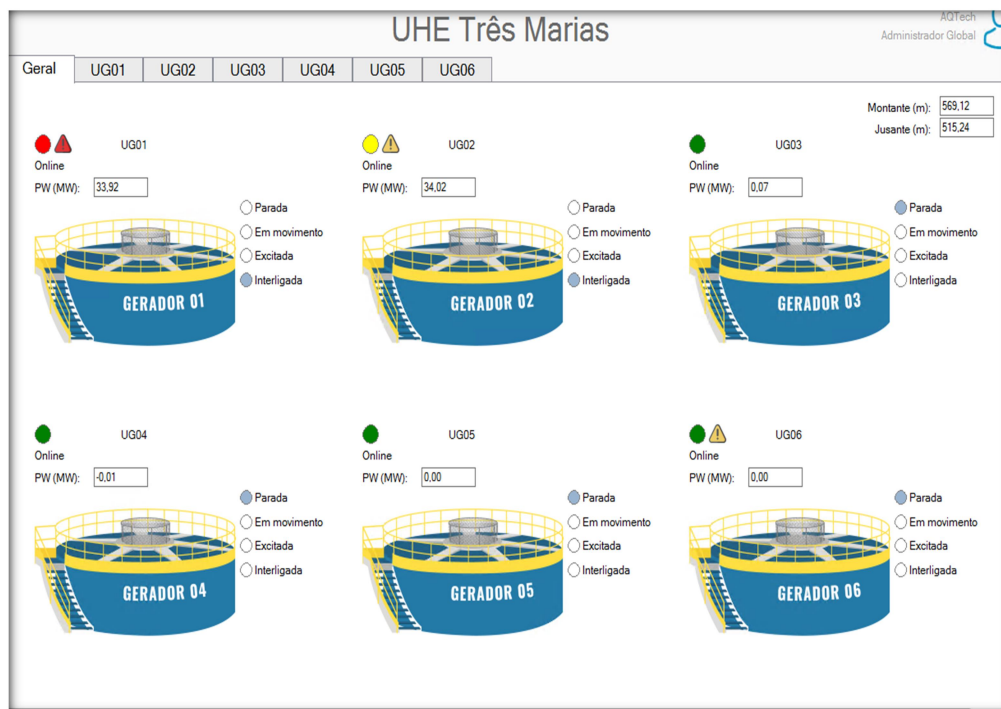


FIGURA 5 – Tela do sistema de Monitoramento e proteção (SMP) Contendo as 06 unidades geradoras

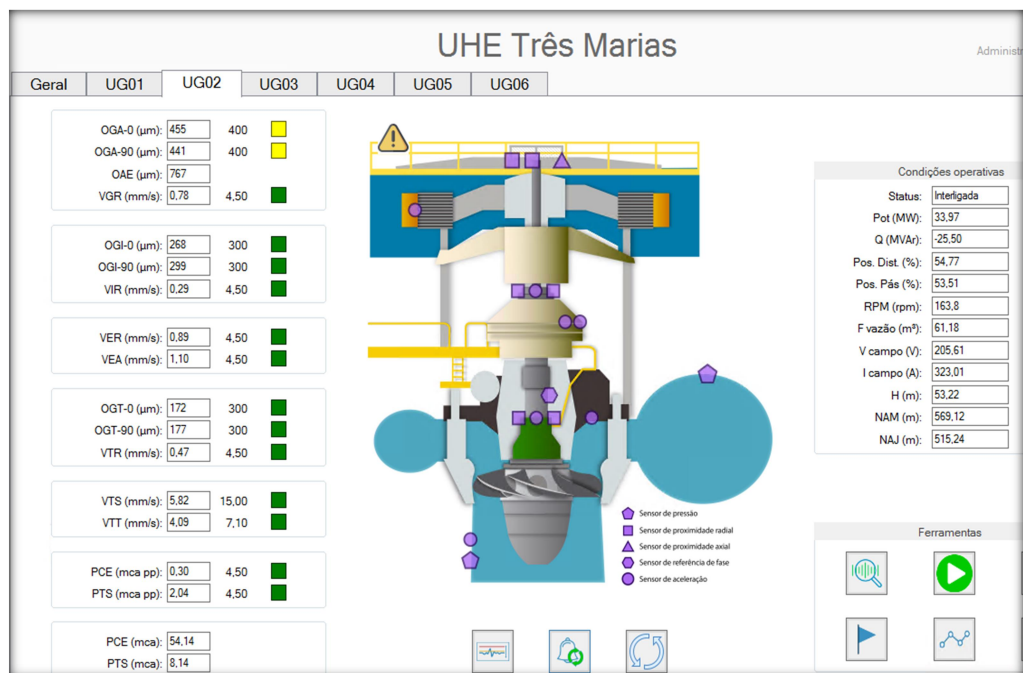


FIGURA 6 – Tela do SMP com posição e leituras dos pontos de oscilação e vibração, mais parâmetros de processo.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ISO 7919-3, Mechanical vibration of non-reciprocating machines — Measurements on rotating shafts and evaluation criteria — Part 3: Coupled industrial machines
- (2) ISO 7919-5, Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts — Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants
- (3) ISO 10816-1, Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on nonrotating parts — Part 1: General guidelines
- (4) ISO 10816-5:2000, Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on nonrotating parts — Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants
- (5) Relatório de Diagnóstico Preditivo da UG 01 – Documento número 11.110– PO/MG – 3026/14 da Cemig GT - Gerência de Planejamento e Engenharia de Manutenção da Geração – PO/MG;
- (6) Relatório de Diagnóstico Preditivo da UG 02 – Documento número 11.110– PO/MG – 3027/14 da Cemig GT - Gerência de Planejamento e Engenharia de Manutenção da Geração – PO/MG;
- (7) Relatório de Diagnóstico Preditivo da UG 03 – Documento número 11.110– PO/MG – 3028/14 da Cemig GT - Gerência de Planejamento e Engenharia de Manutenção da Geração – PO/MG;
- (8) Relatório de Diagnóstico Preditivo da UG 02 – Documento número 11.110– PO/MG – 3173/14 da Cemig GT - Gerência de Planejamento e Engenharia de Manutenção da Geração – PO/MG;
- (9) Relatório de Diagnóstico Preditivo da UG 03 – Documento número 11.110– PO/MG – 3182/14 da Cemig GT - Gerência de Planejamento e Engenharia de Manutenção da Geração – PO/MG;
- (10) Relatório de Diagnóstico Preditivo da UG 02 – Documento número 11.110– PO/MG – 3247/15 da Cemig GT - Gerência de Planejamento e Engenharia de Manutenção da Geração – PO/MG;

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Mestre em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Especialista em Docência no Ensino Superior e Gestão Acadêmica pelo Instituto Metodista Izabela Hendrix (IMI), Especialista em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência pela UFMG, Especialista em Gestão de Negócios pela UFMG, Especialista em Engenharia de Manutenção pela PUC de Minas Gerais, graduado em Engenharia Industrial Elétrica pela Universidade Federal de São João Del-Rei. É Engenheiro Coordenador Sênior na Superintendência de Planejamento e Operação de Geração e Transmissão na CEMIG Geração e Transmissão - CEMIG GT. Trabalha na Cemig desde 1984, tendo atuado nas áreas de Operação e Manutenção, Projetos de Usinas, Engenharia e Planejamento de Transmissão, Gestão de Projetos e atualmente na Gerência de Planejamento e Engenharia de Manutenção da Geração. É Professor dos cursos de Engenharia de Produção e Engenharia Civil no Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix em Belo Horizonte. Atua nas seguintes Áreas: Instalações Elétricas, Circuitos Elétricos, Gerenciamento de Energia e Instalações Prediais. É membro da CPA do Centro Universitário UniHorizontes como representante da Sociedade Civil Organizada desde 2011.