



XXV SNPTEE

SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4201

GGH/08

10 a 13 de novembro de 2019

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

#### **Aportes da Indústria 4.0 para a Manutenção Baseada na Condição de Geradores Elétricos: a experiência de Itaipu Binacional**

**ANDRÉ TOMAZ DE CARVALHO(\*1); RENATO DE OLIVEIRA ROCHA(1); BRUNA DE ANDRADE BASTOS FONSECA(1); MONIQUE DA CRUZ BENEVENUTO(1); JOÃO ANTONIO FERREIRA(2); DIOGO RAFAEL CORREA MARQUES(2); ALEXSANDRA SANTANA DA SILVA(2); JOSÉ QUIRILOS ASSIS NETO(3); RODRIGO ANDRES ALFREDO RAMOS GALEANO(3);  
CEPEL(1);PUC-Rio(2);IB(3);**

#### **RESUMO**

A experiência de quase duas décadas após vultuosos investimentos em monitoramento de geradores em usinas de eletricidade mostrou que os resultados obtidos, embora significativos, permanecem aquém dos retornos esperados. Dentre diversos motivos apontados, destaca-se a dificuldade em traduzir os dados monitorados em informações úteis para a tomada de decisões. No entanto, toda a indústria está atualmente evoluindo rapidamente, apoiada em novas tecnologias com potencial de otimizar seus processos e a própria gestão de seus ativos. O presente artigo trata desta nova revolução industrial, que ficou conhecida como Indústria 4.0, seus impactos na engenharia de manutenção no setor elétrico, e de que forma essas tecnologias podem ser utilizadas na gestão de geradores de energia elétrica e outros ativos do setor, indo de encontro aos objetivos últimos da engenharia de manutenção. Como estudo de caso, é apresentada a arquitetura do Sistema Orientado ao Monitoramento de Ativos (SOMA), desenvolvido pelo CEPEL, e sua implantação no monitoramento de todas as unidades geradoras da Central Hidrelétrica de Itaipu.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Geradores, Engenharia de Manutenção, Indústria 4.0, Manutenção Preditiva, Inteligência Artificial.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

O monitoramento de ativos em plantas de engenharia, particularmente o monitoramento de geradores em usinas de eletricidade, recebeu, a partir dos anos 2000, um crescente investimento por parte das empresas de geração do setor elétrico. No entanto, quase duas décadas de experiência em monitoramento de máquinas mostraram que os resultados obtidos, embora significativos, permanecem aquém dos retornos esperados. Um dos motivos frequentemente apontados está associado ao hermetismo dos sistemas de monitoramento, os quais dependem de profissionais capacitados e dedicados para acessarem as ferramentas, realizarem análises e reportarem resultados indicando possíveis ações às gerências de manutenção e operação. Em suma, destaca-se a dificuldade em traduzir os dados monitorados em informações úteis para a tomada de decisões.

Entretanto, uma nova revolução industrial está em curso, sendo oportuno investigar de que forma novas tecnologias podem agregar valor aos atuais sistemas de geração elétrica. O presente artigo trata desta nova revolução industrial, que ficou conhecida como Indústria 4.0, seus impactos na engenharia de manutenção, e de que forma essas novas tecnologias podem ser utilizadas na gestão de geradores de energia elétrica e outros ativos do setor, indo de encontro aos objetivos últimos da Engenharia de Manutenção.

Na seção 2 serão apresentados sucintamente os pilares da Indústria 4.0, e de que forma cada um destes aportes tecnológicos afetará a indústria em geral. Na seção 3 será feita uma análise sobre a aderência dos princípios da Indústria 4.0 às demandas da manutenção, e esboçaremos uma arquitetura de uma Engenharia de Manutenção 4.0. Na seção 4 será apresentada, como estudo de caso, a arquitetura do Sistema Orientado ao Monitoramento de Ativos (SOMA), desenvolvido pelo Cepel, e sua implantação no monitoramento de todas as unidades geradoras da Central Hidrelétrica de Itaipu.

(\*) CEPEL - Av. Horácio Macedo 354, CEP 21941-911, Cidade Universitária – RJ – Brasil

10 a 13 de novembro de 2019

## 2.0 - UMA NOVA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Uma revolução industrial é iniciada e conduzida pela introdução de novas tecnologias que modificam drasticamente os modos de produção, aumentando a eficiência dos processos e a qualidade dos produtos, reduzindo custos, e exigindo a adaptação de profissionais às novas tecnologias. A primeira revolução industrial consistiu na introdução da máquina a vapor e de diversas tecnologias mecânicas no fim do século XVIII, criando o conceito moderno de indústria. Em fins do século XIX, uma segunda revolução foi propulsionada pela introdução da energia elétrica e das linhas de montagem com produção em massa, agregando economia de escala aos processos produtivos. Uma terceira revolução se deu ainda na década de 60 do século XX, com a introdução da automação industrial, robôs e computadores nas linhas de montagem. A quarta revolução que está em pleno curso, a Indústria 4.0, caracteriza-se pela criação de redes inteligentes de máquinas e processos industriais com o auxílio das tecnologias da informação e de telecomunicações. O resultado são sistemas ciber-físicos, que unem o mundo físico ao digital, dotando máquinas e processos de inteligência distribuída, capacidade de intercomunicação e capacidade de orientar a operação e a gestão dos mesmos através de réplicas simuladas digitalmente [1].

O termo Indústria 4.0 foi originalmente proposto na Feira de Hanover em 2011 como um projeto de alta tecnologia do governo alemão que propunha uma indústria totalmente computadorizada. Em outubro de 2012 o Grupo de Trabalho em Indústria 4.0 finalizou suas recomendações de implementação, as quais foram publicadas na mesma feira no ano de 2013. Este grupo de trabalho, capitaneado pelos engenheiros Siegfried Dais (Bosh) e Henning Kagermann (Academia Alemã de Ciência e Engenharia) colocou os fundamentos da Indústria 4.0 que vêm sendo adotados nos diversos setores da indústria em escala global [2].

### 2.1 Pilares Tecnológicos

As Indústria 4.0 conta com importantes pilares tecnológicos que a viabilizam e impulsionam. Dentre eles, destacam-se a Internet das Coisas (IoT), a Computação Cognitiva, os Sistemas Ciber-Físicos e a Manufatura 3D.

- A **Internet das Coisas (IoT)** consiste na rede de dispositivos físicos que, incorporando sistemas embarcados, software, sensores, atuadores e conectividade, permite que estes se conectem, troquem dados e compartilhem-nos em núvens públicas ou privadas, criando oportunidades para uma integração mais direta entre o mundo físico e os sistemas baseados em computador. Aplicada à indústria, a **Internet das Coisas Industrial (IIoT)** consiste na interconexão de dispositivos inteligentes e sistemas de automação em uma única plataforma no ambiente industrial, conduzindo a melhorias de eficiência, benefícios econômicos e à redução de esforços humanos.
- A **Computação Cognitiva** descreve plataformas de tecnologia que, em linhas gerais, são baseadas nas disciplinas científicas da Inteligência Artificial (IA) e do Processamento Digital de Sinais. Essas plataformas abrangem: aprendizado de máquina, raciocínio, processamento de linguagem natural, reconhecimento de fala, visão de máquina, etc.
- Os **Sistemas Ciber-Físicos** estabelecem uma fusão entre o mundo real e o digital. Máquinas e processos são minuciosamente digitalizados, criando réplicas digitais simuladas (*digital twins*) que recebem sinais monitorados e calculam os estados do sistema real, auxiliando efetivamente na operação e na manutenção dos ativos industriais replicados digitalmente.
- A **Manufatura Aditiva** é o processo de fabricação de peças e componentes mecânicos através da controlada adição de material a partir de um modelo digital tridimensional. A manufatura aditiva ou impressão 3D permite obter componentes para prototipação e reparo em menor tempo e com menores custos em relação aos tradicionais processos de fabricação ou aquisição no mercado.

### 2.2 Princípios de Implementação

A implantação deste novo paradigma industrial requer um cuidadoso projeto incorporando a aplicação de uma ou mais das tecnologias supracitadas. Os princípios de implantação listados a seguir foram propostos por Hermann, Pentek e Otto [3] como uma referência na implantação da Indústria 4.0 em diversos cenários.

1. **Interoperabilidade.** Consiste na capacidade de intercomunicação de todos os dispositivos de uma planta, entre si e com operadores humanos, através de protocolos padronizados em redes compartilhadas.
2. **Virtualização.** Consiste na capacidade de implementação de sistemas ciber-físicos. Dados adquiridos da planta devem alimentar modelos virtuais e simulações de processos e equipamentos, de modo que

10 a 13 de novembro de 2019

cópias do mundo real possam ser criadas digitalmente. A réplica digital (*digital twin*) deve ser capaz de monitorar inclusive sua própria condição e alertar operadores em caso de falhas e anomalias.

3. **Descentralização.** Consiste na capacidade de distribuir sistemas embarcados inteligentes ao longo da planta industrial, aptos a realizar processamentos e a tomar decisões de forma autônoma.
4. **Processamento em Tempo Real.** Consiste na capacidade de coletar e processar dados dos processos e equipamentos em tempo real. Dessa forma, uma planta rastreada continuamente pode reagir prontamente a falhas, realocar recursos e alertar seus operadores.
5. **Orientação a Serviços.** Consiste na capacidade de prover soluções de software em uma arquitetura orientada a serviços (*Service Oriented Architecture*), os quais podem ser solicitados por máquinas ou humanos, internamente ou mesmo desde fora da própria empresa através de conexões via Internet.
6. **Modularidade.** Consiste na capacidade de readaptação através da substituição ou da expansão de módulos. Sistemas modulares podem assim ser adaptados em função de flutuações sazonais, mudanças de produtos ou mesmo mudanças estruturais.

Os princípios acima podem ser usados como guias gerais para identificar oportunidades de implantação dos conceitos da Indústria 4.0, ou ainda como requisitos funcionais das plantas industriais do futuro. A seguir, será feita uma análise da aderência desses princípios aos processos da Engenharia de Manutenção.

### 3.0 - ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO 4.0

O potencial de aplicação da Indústria 4.0 é particularmente atraente para a Engenharia de Manutenção. Um expressivo exemplo reportado pelo AES Advisory Group [4] afirma que “a empresa Global Process Industry informou ter perdido US\$ 20 Bilhões/ano (ou quase 5% de sua produção total) devido a paradas não programadas, sendo 80% dessas perdas evitáveis”. Em contrapartida, a empresa China Steel [5] reportou ter reduzido em três anos o tempo de inatividade não planejado de 250 horas para 65 horas (redução de 74%), com uma economia de US\$ 11 milhões, após a implantação de tecnologias da Indústria 4.0 em suas linhas de produção. A Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) [1] estima que o impacto da Indústria 4.0 no Brasil produzirá uma redução de custos na indústria brasileira de no mínimo R\$ 73 Bilhões/ano, dos quais R\$ 31 Bilhões/ano (cerca de 43%) corresponderão a reduções de custos de manutenção e reparo.

A seguir será faremos um exame do estado dos sistemas atualmente utilizados pela Engenharia de Manutenção, particularmente no setor elétrico, e exploraremos de que forma os princípios elencados acima respondem às necessidades e demandas identificadas.

#### 3.1 Pressupostos

A intensificação do monitoramento de máquinas e processos como parte das tarefas de gestão de ativos pela Engenharia de Manutenção ocorreu no setor elétrico por volta do ano 2000. Dentre os fatores que proporcionaram esse crescimento, destaca-se a redução no custo das tecnologias de monitoramento, acarretada pelo decréscimo histórico (o qual ainda se verifica) nos custos dos sensores, das tecnologias de armazenamento de dados e dos dispositivos eletrônicos utilizados para aquisição e processamento dos mesmos. A expansão do monitoramento gerou, portanto, um grande volume de dados armazenados, o qual continua aumentando continuamente.

Entretanto, os resultados deste monitoramento intensivo de ativos têm ficado aquém do esperado, devido à dificuldade inerente de processar o grande volume de dados e extrair informações úteis. Em outubro de 2014, a Eletronorte sediou em Tucuruí – PA o I Workshop de Monitoramento e Diagnóstico de Máquinas Hidráulicas [9], que reuniu cerca de 80 profissionais das Empresas Eletrobras para trocar experiências e conhecimentos, onde se identificou que a fragilidade dos sistemas de monitoramento atualmente adotados no Brasil está associada principalmente à dificuldade de manutenção dos mesmos, à limitação das ferramentas de análise disponíveis e ao hermetismo das ferramentas providas pelos diversos fabricantes.

Esta dificuldade em transformar dados em informações não é exclusiva do setor elétrico. Segundo um levantamento do IDC [7], apenas 5% dos dados atualmente gerados em uma escala global são, de fato, analisados. No entanto, a aplicação dos princípios da Indústria 4.0 aos sistemas de monitoramento para manutenção pode conduzir a uma nova arquitetura, a chamaremos de Engenharia de Manutenção 4.0, capaz de solucionar grande parte destes problemas.

10 a 13 de novembro de 2019

### 3.2 Princípio da Interoperabilidade

A aplicação do Princípio da Interoperabilidade determina que na Engenharia de Manutenção 4.0 todos os dados de monitoramento sejam abertos, transparentes, compartilhados e tornados disponíveis a todos os dispositivos, sistemas e usuários com acesso à rede da manutenção. A aquisição e o compartilhamento dos dados fará uso das tecnologias da IIoT, disponibilizando todos os dados e informações em uma nuvem pertencente à empresa.

Dados, informações e serviços devem ser disponibilizados aos usuários de forma flexível. Dispositivos de Borda – Interfaces Homem-Máquina junto aos equipamentos monitorados – devem ser disponibilizados como ferramentas de auxílio a inspeções e intervenções.

Na integração de diferentes sistemas, além de adaptadores de dados específicos, o protocolo OPC-UA [8] se destaca na implementação deste princípio tendo sido criado com vistas à unificação dos diversos padrões de comunicação industrial existentes. A adoção de protocolos padrão de comunicação da Internet permitirá ainda que todas as funcionalidades da Engenharia de Manutenção 4.0 estejam disponíveis tanto em computadores Workstations quanto em dispositivos de borda como tablets e smartphones através de interfaces Web responsivas.

### 3.3 Princípios da Modularidade e da Orientação a Serviços

A aplicação do Princípio da Modularidade determina que na Engenharia de Manutenção 4.0 os sistemas de monitoramento sejam modulares: expansíveis, flexíveis e reconfiguráveis através da adição ou da substituição de módulos de hardware.

Para estender a flexibilidade da modularidade inclusive aos softwares do sistema, é fundamental que toda a arquitetura da Engenharia de Manutenção 4.0 seja orientada a serviços. Dessa forma, cada funcionalidade de processamento de dados ficará desacoplada das demais. Por exemplo, um serviço de cálculo de FFT pode ser disponibilizado como ferramenta no sistema, e ser utilizado tanto em análises de vibração quanto em análises de qualidade de energia. Possíveis serviços poderão incluir: sistemas de diagnóstico baseados em computação cognitiva, algoritmos de mineração de dados, ferramentas de análise, sistemas especialistas baseados em regras, identificação de alarmes, emissão de relatórios, etc.

### 3.4 Princípios da Descentralização e da Capacidade de Processamento em Tempo Real

Na Engenharia de Manutenção 4.0 os dispositivos de aquisição de dados distribuídos ao longo de toda a planta serão sistemas embarcados com capacidade de processamento local em tempo real. Este processamento a nível local poderá incluir o tratamento dos sinais adquiridos, a realização de diagnósticos locais junto ao ativo monitorado, e a implementação de réplicas digitais ciber-físicas. Os resultados deste processamento local junto ao ativo monitorado, juntamente com os próprios dados de monitoramento, serão então repassados a serviços de mais alto nível disponíveis na rede de manutenção.

### 3.5 Princípio da Virtualização

Na Engenharia de Manutenção 4.0 todos os equipamentos e processos monitorados serão simulados em tempo real de acordo com modelos físicos e matemáticos previamente determinados. Desta forma, o diagnóstico pode ser detectado como um desvio entre a condição medida e a condição esperada, e as causas de sinais fora da normalidade poderão ser calculadas imediatamente a partir dos modelos simulados (gêmeos ou réplicas digitais) e dos sinais medidos.

### 3.6 Arquitetura da Engenharia de Manutenção 4.0

A aplicação dos princípios da Indústria 4.0 à Engenharia de Manutenção conduz assim à arquitetura orientada a serviços representada na Figura 1. O sistema organiza-se em torno de uma rede segura de manutenção, com controle de acesso de usuários e sistemas.

Sistemas de aquisição de dados modulares (Figura 1.a) dotados de capacidade de processamento embarcado em tempo real e de interconectividade devem ser instalados junto aos ativos de modo a transformá-los em itens de uma Internet das Coisas Industrial (IIoT). A simulação em tempo real de modelos físico-matemáticos dos ativos monitorados é realimentada com a aquisição de dados do processo, criando réplicas digitais (ou digital twins) dos equipamentos e processos (Figura 1.b), transformando a planta monitorada em um sistema ciber-físico. Os dados adquiridos e as simulações digitais alimentam em tempo real serviços de sistemas especialistas

10 a 13 de novembro de 2019

de diagnóstico locais (Figura 1.c), os quais têm a capacidade de alertar imediatamente todo o sistema de manutenção sobre possíveis desvios das condições normais dos ativos monitorados.

Serviços Web (Figura 1.h) disponíveis na rede de manutenção fazem o roteamento dos dados e dão suporte ao gerenciamento modular de todos os demais serviços disponíveis. Novos serviços de visualização, processamento e análise podem ser desenvolvidos e integrados ao sistema de manutenção de forma modular. Além do mais, os serviços Web habilitam a utilização de dispositivos de borda (Figura 1.d) junto à planta monitorada e em toda a empresa através de conexões Wifi para fins de inspeção e suporte a intervenções.

Serviços de nuvem (Figura 1.e) armazenam dados e informações de forma padronizada, de modo que todos os serviços e usuários autorizados no sistema de manutenção tenham acesso transparente a todas as informações disponíveis. Adicionalmente, serviços de mineração de dados (Figura 1.g) atuam na recuperação de informações relevantes, repassando-as aos serviços de análise e diagnóstico.

Serviços de computação cognitiva (Figura 1.f) realizam diagnósticos de mais alto nível e com maior capacidade de processamento do que os diagnósticos de borda realizados junto à planta monitorada (Figura 1.c). Ferramentas de Inteligência Artificial e Processamento de Sinais são disponibilizadas como serviços de diagnóstico e prognóstico, gerando subsídios para a orientação dos processos da Engenharia de Manutenção.

Serviços de interconectividade (Figura 1.i) fazem a importação de dados de outros sistemas, como historiadores, supervisórios ou sistemas de monitoramento proprietários, registrando informações na nuvem em formato padronizado. Habilitam ainda a exportação de dados a outros sistemas ou serviços externos, garantindo a interconectividade da rede de manutenção com redes corporativas, demais sistemas ou mesmo a Internet.

Finalmente, os serviços Web associados aos demais serviços de análise deverão não somente auxiliar no diagnóstico e na identificação das ações concretas a serem tomadas, mas auxiliar na própria execução das mesmas. Assim, os dispositivos de borda contarão com diagramas detalhados dos equipamentos, roteiros precisos de desmontagem, intervenção e remontagem para a execução dos procedimentos indicados, etc. Tais ferramentas poderão mesmo incluir suporte a realidade aumentada através das câmeras disponíveis em tablets e smartphones.

Orientando todo o processo de manutenção, o sistema da Engenharia de Manutenção 4.0 deverá ser capaz de realizar diagnósticos e prognósticos, detectar defeitos, sugerir e orientar intervenções e, através dos serviços de interconectividade (Figura 1.i), até mesmo solicitar eventualmente a compra de materiais junto a fornecedores ou a impressão 3D das peças e componentes necessários.

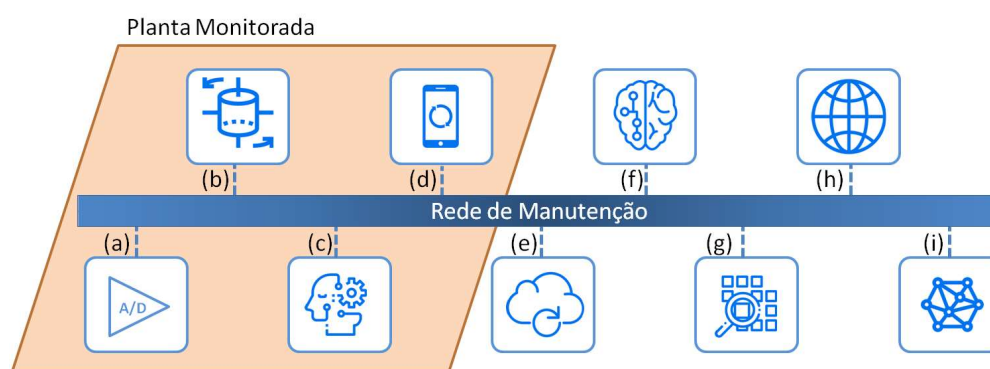


FIGURA 1 – Arquitetura de serviços na Engenharia de Manutenção 4.0. Da esquerda para a direita: a) Aquisição de dados, b) Serviços de simulação de sistemas ciber-físicos, c) Sistemas especialistas de diagnóstico, d) Suporte a dispositivos de borda, e) Serviços de nuvem, f) Serviços de computação cognitiva, g) Serviços de mineração de dados, h) Serviços Web, i) Serviço de interconexão a outros sistemas (via OPC-UA ou adaptadores específicos).



10 a 13 de novembro de 2019

#### 4.0 - O PROJETO SOMA-MATRIX UG

Apresentaremos agora como estudo de caso a arquitetura do sistema SOMA-Matrix UG, implantado na Central Hidrelétrica de Itaipu com o objetivo de colocar em prática os conceitos da Engenharia de Manutenção 4.0 na gestão de suas 20 unidades hidrogeradoras.

Um sistema de Engenharia da Manutenção 4.0 como descrito acima é, necessariamente, um vultuoso projeto. No entanto, um histórico de investimentos pontuais do Cepel, por um lado, e de Itaipu, por outro, colocaram as bases para viabilizar a sua implantação na maior usina hidrelétrica do mundo em produção de energia elétrica.

##### 4.1 Breve Histórico do SOMA

O Cepel há 45 anos desenvolve tecnologia voltada para o monitoramento e o diagnóstico de ativos de engenharia, particularmente hidrogeradores, e uma grande parte dos desenvolvimentos realizados no passado se revelaram componentes indispensáveis à Engenharia de Manutenção 4.0, demonstrando que o direcionamento das pesquisas desenvolvidas pelo centro esteve ao longo dos anos alinhado com as mais promissoras tendências em monitoramento e gestão de ativos.

Ainda na década de 90, o Cepel desenvolveu uma sofisticada ferramenta de modelagem e simulação computacional do comportamento dinâmico de máquinas rotativas, chamada **Rotmef**. O Rotmef é capaz de calcular tanto o comportamento dinâmico natural do sistema modelado, ou seja, suas frequências e modos naturais de vibração (à flexão e à torção), quanto o seu comportamento vibratório previsto (em deslocamento), quando submetido a uma determinada condição de carregamento simulada. Com o conhecimento obtido acerca da "personalidade dinâmica" teórica do sistema, a ferramenta permite uma melhor compreensão de tudo o que pode ser observado pelo monitoramento do equipamento real.

A experiência com instrumentação modular foi adquirida pelo Cepel sobretudo nos anos 2000, com o desenvolvimento do Sistema **DiaHger**, responsável pelo monitoramento contínuo da condição operacional de unidades hidrogeradoras quanto a grandezas de processo e de natureza mecânica. O Sistema DiaHger foi desenvolvido no contexto de um projeto P&D Aneel em parceria com a Eletronorte, e foi instalado experimentalmente nas usinas de Tucuruí e Coaracy Nunes.

A fim de proporcionar um uso efetivo da grande quantidade de dados adquiridos pelo monitoramento, o Cepel desenvolveu ainda o sistema especialista baseado em regras **ICA** (Inteligência Computacional Aplicada), visando a incorporação dos serviços de diagnóstico e prognóstico automáticos da condição operacional dos equipamentos monitorados.

Paralelamente, o Cepel desenvolveu o Sistema **IMA-DP**, um sistema de monitoramento online de descargas parciais em máquinas rotativas, baseado inteiramente em instrumentação modular e em técnicas de processamento digital de sinais, o qual representa uma grande inovação no monitoramento deste tipo de grandeza. O IMA-DP atualmente é responsável pelo monitoramento de descargas parciais em todas as usinas da Eletronorte.

Quanto à interconectividade, o Sistema **SIGMA** foi desenvolvido pelo Cepel em um projeto de P&D Aneel em parceria com a Chesf em 2005, visando a integração de diversas bases de dados de supervisão e monitoramento com a consolidação dos dados em uma base centralizada. Além do mais, nos últimos anos, a experiência de outros produtos do Cepel como o SAGE levou ao desenvolvimento de plugins de comunicação baseados no protocolo OPC-UA, um forte pilar da Indústria 4.0.

Finalmente, na última década, o Cepel investiu na integração de todos os desenvolvimentos anteriores em um único sistema Web com arquitetura de software orientada a serviços, chamado **SOMA** (Sistema Orientado ao Monitoramento de Ativos). Por suas características, o SOMA é uma solução totalmente aderente aos requisitos da Engenharia de Manutenção 4.0, integrando em uma única plataforma toda a expertise do Cepel adquirida no ao longo de quatro décadas e meia de pesquisa aplicada.

##### 4.2 Breve Histórico do Projeto Matrix UG

Na década de 90, o corpo técnico de Itaipu idealizou um grande sistema de monitoramento e diagnóstico de seus geradores, compatível com o porte da usina, então a maior hidrelétrica do mundo. O sistema denominado Mondig, cujo escopo englobava grandezas mecânicas, elétricas e de processo de todas as máquinas de geração, teve o seu fornecimento oficialmente concluído no ano de 2002. No entanto, o sistema instalado não

10 a 13 de novembro de 2019

satisfaz às expectativas e aos requisitos funcionais do projeto, o que resultou na sua rejeição por parte de Itaipu em 2004, e em uma indenização por parte dos fornecedores à usina em 2008.

Um importante legado que os engenheiros de Itaipu elaboraram nesta época consistiu na **modelagem da árvore de falhas** de seus hidrogeradores, a qual deveria ser utilizada como ponto de partida para a implementação do sistema especialista de diagnóstico da usina.

Adicionalmente, a Engenharia de Manutenção de Itaipu, que já vinha desenvolvendo sofisticados **modelos numéricos** de simulação dos hidrogeradores, fez um grande investimento na **modelagem tridimensional** destes equipamentos, à exemplo dos modelos da barragem desenvolvidos pelo CEASB (Centro de Estudos Avançados sobre Segurança de Barragens) – pertencente ao Parque Tecnológico de Itaipu (PTI). Este esforço resultou na modelagem de praticamente toda a Central Hidrelétrica de Itaipu na forma de modelos tridimensionais de alta precisão.

No ano de 2011, com as experiências adquiridas pelo projeto Mondig, Itaipu idealizou um novo e ousado sistema de monitoramento, contando então com o suporte do Cepel e a participação de seus parques tecnológicos (PTIs). A plataforma adotada foi o SOMA, e o projeto desta matriz de monitoramento das unidades geradoras foi denominado **Matrix-UG**. No ano de 2015 foi dado início ao projeto, e no ano de 2019 a entrega final da primeira etapa do projeto está sendo concluída, incluindo o monitoramento em tempo real de todas as máquinas, a consolidação do histórico de todos os sinais monitorados, a visualização 3D dos geradores com sinais de monitoramento online, a interconexão com bases de historiadores da usina e o suporte à geração de relatórios de manutenção.

#### 4.3 Características do Sistema SOMA-Matrix UG

A implantação da primeira etapa do sistema SOMA-Matrix UG, conforme mencionado no item anterior, foi articulada em torno dos serviços de aquisição de dados, armazenamento, monitoramento e geração de relatórios de manutenção.

Cada Unidade de Aquisição e Monitoramento (UAM) responsável pelo monitoramento de um hidrogerador foi projetada como um hardware de arquitetura modular com capacidade de monitorar cerca de 500 sinais analógicos em tempo real, incluindo: acelerômetros, proximímetros, RTDs, sinais de descargas parciais, tensões e correntes, além de entradas e saídas digitais. Cada UAM possui ainda uma unidade de processamento embarcado contendo um processador Intel i7 com sistema operacional *real time*, três interfaces de rede ethernet conectadas em redundância, além de interfaces RS-232, RS-485, e GPIB. Ao todo, as 20 UAMs da usina recebem cerca de 10.000 sinais em tempo real. A Figura 2 ilustra o hardware modular de aquisição de dados (A) e a conexão dos sinais oriundos da máquina (B).

Cada duas UAMs são conectadas a um servidor de aplicação, totalizando 10 servidores para atender a todas as 20 UAMs da usina. Além dos servidores de aplicação, dois Storages de 40 TB armazenam os dados adquiridos. A Figura 2.C mostra cinco servidores de aplicação com um Storage no Centro de Monitoramento da usina.

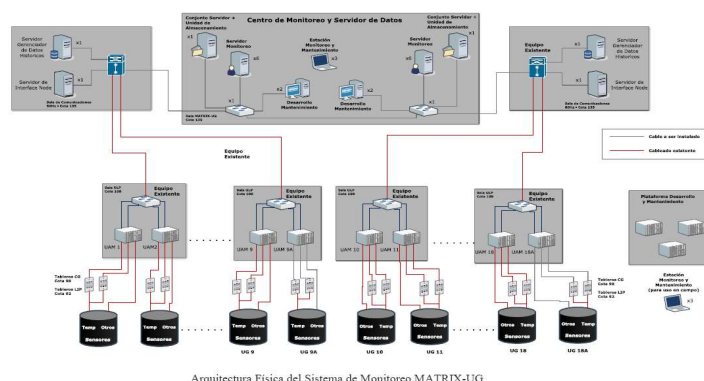
Além dos sinais analógicos adquiridos, foram implementados no SOMA adaptadores para receber dados dos historiadores (OSI Soft PI) correspondentes aos lados brasileiro e paraguaio. A Figura 3 mostra a arquitetura de hardware completa do sistema implementado na usina.

O sistema está operacional desde 2018, aquistando uma quantidade massiva de dados de forma estável e confiável. A Figura 4 mostra duas telas de supervisão do sistema, onde os usuários podem navegar em uma interface Web pelo modelo tridimensional do gerador, localizar sensores e visualizar medições em tempo real.

10 a 13 de novembro de 2019



FIGURA 2 – (A) Pannel frontal de uma UAM contendo o hardware modular de aquisição e processamento. (B) Pannel traseiro de uma UAM contendo as conexões dos sinais dos sensores. (C) Servidores e Storage.



Arquitectura Física del Sistema de Monitoreo MATRIX-UG

FIGURA 3 – Arquitetura completa de hardware no projeto SOMA – Matrix UG.

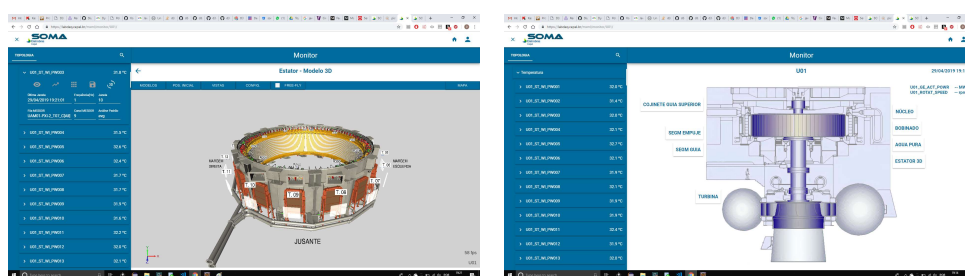


FIGURA 4 – Telas de interfaces Web de monitoramento do sistema SOMA – Matrix UG.

#### 4.4 Perspectivas Futuras

A etapa inicial de implantação do SOMA-Matrix UG gerou como resultado um sistema estável de aquisição e persistência de dados com suporte a monitoramento em tempo real, análises e emissão de relatórios de manutenção.

No entanto, a arquitetura do sistema foi projetada para ser expandida até os limites da Engenharia de Manutenção 4.0. Assim, próximas etapas incluem, a curto e a médio prazo, com o auxílio dos PTIs, a incorporação do Rotmef e de modelos termodinâmicos das máquinas (desenvolvidos por Itaipu) para a implementação dos sistemas ciber-físicos dos geradores; bem como a incorporação do ICA como um sistema especialista baseado em regras, fazendo uso da árvore de falhas previamente desenvolvida pela engenharia de manutenção de Itaipu – a qual está em processo de revisão para inclusão no sistema.



10 a 13 de novembro de 2019

A longo prazo, a implementação de sistemas de realidade aumentada poderão fazer uso dos modelos tridimensionais e auxiliar técnicos a realizarem inspeções e intervenções nos equipamentos. Técnicas de mineração de dados e de computação cognitiva também serão incorporadas de modo a prover diagnósticos cada vez mais sofisticados.

## 5.0 - CONCLUSÃO

O presente informe técnico introduziu o conceito de Indústria 4.0, e investigou de que forma os aportes tecnológicos desta nova revolução industrial podem beneficiar as melhores práticas da engenharia de manutenção. Foi demonstrado que os potenciais benefícios para a engenharia manutenção são consideráveis, e foram esboçadas no item 3.0 as características do que chamamos de uma Engenharia de Manutenção 4.0. Finalmente, como estudo de caso, foi descrita a implementação do projeto SOMA-Matrix UG na Central Hidrelétrica de Itaipu, onde os princípios da Engenharia de Manutenção 4.0 estão sendo colocados em prática de forma sistemática. Os autores acreditam que o projeto Matrix UG fará de Itaipu uma referência mundial também em monitoramento de ativos de geração elétrica, e que os princípios aqui apresentados deverão ser seguidos por outras empresas no futuro da engenharia de manutenção.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Website: <https://www.abdi.com.br/inovacao/agenda-para-a-industria-4-0>
- (2) Website: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>
- (3) Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios - December 2015 - DOI: 10.1109/HICSS.2016.488 - Conference: 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) - Mario Hermann, Tobias Pentek & Boris Otto.
- (4) ARC Advisory Group, Passing the Insurance Acid Test with APM, 2011.
- (5) Taken from published case study and English transcription of China Steel, FOMOS AI case study video.
- (6) Website: <https://blog.viscosity.com/blog/what-is-industry-4.0-and-what-does-it-mean-for-my-manufacturing>
- (7) Kelly III, Dr. John (2015). "Computing, cognition and the future of knowing". IBM Research: Cognitive Computing. IBM Corporation.
- (8) <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>
- (9) Website: <http://agencia.eletronorte.gov.br/site/2014/10/24/eletrobras-eletronorte-realiza-workshop-de-monitoramento-de-unidades-geradoras/>

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Dr. André Tomaz Carvalho nasceu em Fortaleza, Brasil, em 7 de setembro de 1977. Graduado Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2001, recebeu o título de Mestre em Ciências pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP) em 2005, e o título de Doutor em Ciências pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ) em 2014. Atua profissionalmente como Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) da Eletrobras há 17 anos. Possui mais de 40 artigos publicados em periódicos científicos e seminários técnicos e duas requisições de patentes de invenções. Atualmente é gerente do Projeto SOMA, plataforma de monitoramento de ativos de engenharia para a indústria 4.0. É membro do Cigré A1 e atual coordenador do A1.61 sobre descargas parciais em grandes motores, o qual conta com cientistas e especialistas de 14 países.