

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM REDES DE COMPUTADORES E
TELEINFORMÁTICA

EDUARDO QUINALHA

**GÊMEOS DIGITAIS, O FUTURO DA INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO DE
CASO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2018

EDUARDO QUINALHA

GÊMEOS DIGITAIS, O FUTURO DA INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO DE CASO

Monografia de Especialização, apresentada ao Curso de Especialização em Redes de Computadores e Teleinformática, do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientadora: Profa. Dra. Tânia Lúcia Monteiro

CURITIBA
2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso de Especialização em Redes de Computadores e
Teleinformática



TERMO DE APROVAÇÃO

GÊMEOS DIGITAIS, O FUTURO DA INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO DE CASO

por

EDUARDO QUINALHA

Esta Monografia foi apresentada em 23 de Novembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Redes de Computadores e Teleinformática. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Tânia Lúcia Monteiro
Orientadora

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
Membro titular

Prof. M.Sc. Omero Francisco Bertol
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à minha família, amigos e em especial aos colegas de trabalho que tão prontamente se dispuseram a ajudar, prestando informações e compartilhando conhecimentos.

AGRADECIMENTOS

Com certeza este espaço não será suficiente para agradecer a todos que de alguma forma colaboraram com o resultado final deste trabalho. Sendo assim, desde já peço desculpas a quem eventualmente não esteja formalmente citado neste texto.

Agradeço especialmente à minha orientadora Profa. Dra. Tânia Lúcia Monteiro por ter me guiado durante esta trajetória, além da sugestão do tema que veio a combinar perfeitamente com o momento atual de minha vida profissional.

Aos meus colegas de sala que por tantas vezes colaboraram com o aprendizado durante o curso.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, e amigos pela compreensão face a minha ausência durante o período de elaboração deste texto.

Agradeço especialmente aos meus amigos e colegas de trabalho pelas informações técnicas fornecidas e pela prestatividade em sanar minhas dúvidas conforme elas surgiram.

“Eu acredito na intuição e na inspiração. A imaginação é mais importante que o conhecimento. O conhecimento é limitado, enquanto a imaginação abraça o mundo inteiro, estimulando o progresso, dando à luz à evolução. Ela é, rigorosamente falando, um fator real na pesquisa científica”.

(EINSTEIN, Albert, 1931)

RESUMO

QUINALHA, Eduardo. **Gêmeos digitais, o futuro da indústria 4.0: estudo de caso.** 2018. 60 p. Monografia de Especialização em Redes de Computadores e Teleinformática, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O estudo de objetos físicos por meio de modelos digitais não é uma novidade para indústrias e pesquisadores. No entanto, o cenário tecnológico atual permitiu uma confluência de fatores que, juntamente com a chegada da quarta revolução industrial, conhecida como Indústria 4.0, resultaram numa reinvenção do conceito, dando origem ao que se define como Gêmeos Digitais. O potencial desta tecnologia vai além da prototipagem virtual, ela é capaz de fornecer informações e subsídios para antecipar situações antes que elas ocorram, permitindo que se planeje cenários com antecedência, reduzindo custos de manutenção e tempo de paralisação de máquinas, plantas industriais e equipamentos.

Palavras-chave: Engenharia Industrial. Fábricas automáticas. Sistemas de coleta automática de dados. Comunicação digital. Telemetria.

ABSTRACT

QUINALHA, Eduardo. **Digital twins, the future of industry 4.0: case study**. 2018. 60 p. Monografia de Especialização em Redes de Computadores e Teleinformática, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The study of physical objects through digital models is not new to industries and researchers. However, the current technological scenario allowed a confluence of factors that together with the arrival of the fourth industrial revolution, known as Industry 4.0, resulted in a reinvention of the concept, giving rise to what is defined as Digital Twins. The potential of this technology goes beyond virtual prototyping, it is able to provide information and subsidies to anticipate situations before they occur, allowing professionals to plan scenarios in advance, reducing maintenance costs and machinery, plants and equipment downtime.

Keywords: Industrial engineering. Automatic factories. Automatic data collection system. Digital communications. Telemetry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gêmeos digitais aplicados a uma linha de produção	19
Figura 2 - Plataforma Predix da GE Digital.....	21
Figura 3 - Gêmeo digital de uma turbina na plataforma Predix da GE Digital	22
Figura 4 - Plataforma <i>System 1</i> da GE / Bently Nevada	23
Figura 5 - Conjunto Soprador + turbina visualizado pelo <i>System 1</i>	23
Figura 6 - Plataforma 3DEXPERIENCE da Dassault Systemes.....	24
Figura 7 - Rack do sistema 3500 da Bently Nevada	25
Figura 8 - Módulo de sensores sísmicos do Rack 3500.....	26
Figura 9 - Interfaces de comunicação do Rack 3500	26
Figura 10 - Sensor e transdutor de proximidade	27
Figura 11 - Uso do sistema do transdutor de proximidade.....	27
Figura 12 - Tela do <i>System 1 Display</i>	29
Figura 13 - Fluxo de dados da plataforma <i>System 1</i>	29
Figura 14 - Diagrama de blocos simplificado do processo de FCC.....	32
Figura 15 - Desenho esquemático de um conjunto conversor	32
Figura 16 - Vista interna de um compressor centrífugo de dois estágios.....	33
Figura 17 - Fotografia de uma turbina a vapor	34
Figura 18 - Válvula garganta	34
Figura 19 - Sensores da turbina	36
Figura 20 - Posição dos sensores em relação ao eixo.....	36
Figura 21 - Estrutura simplificada da rede do <i>System 1</i>	37
Figura 22 - Arquitetura básica do <i>PI System</i>	38
Figura 23 - Localização dos sensores.....	39
Figura 24 - Internos da caixa de mancal da turbina	41
Figura 25 - Caixa de mancal aberta	41
Figura 26 - Sistema de aspersão de água instalado sobre o trocador de calor	45
Figura 27 - Sistema de aspersão de água na captação de ar do soprador.....	47
Gráfico 1 - Evolução do deslocamento axial desde Jun/15 até Nov/16.....	39
Gráfico 2 - Vibrações versus deslocamento axial.....	43
Gráfico 3 - Vibrações versus temperatura do ar.....	44
Gráfico 4 - Vibrações versus temperatura do óleo	46
Gráfico 5 - Redução de temperatura por aspersão de água na admissão de ar.....	48
Gráfico 6 - Projeção do deslocamento axial.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo das alterações nos <i>sets</i> de alarme e <i>trip</i>	49
--	----

LISTA DE SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CCL	Centro de Controle Local
CIC	Centro de Controle Integrado
DMZ	<i>Demilitarized Zone</i>
FCC	<i>Fluidized Catalytic Cracking</i>
GE	<i>General Electric</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IHM	Interface Homem-Máquina
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
PI	<i>Plant Information</i>
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
RF	Rádio Frequência
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMA	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA.....	15
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 GÊMEOS DIGITAIS.....	17
2.1 O QUE SÃO GÊMEOS DIGITAIS.....	17
2.2 O QUE O MERCADO JÁ OFERECE	21
2.3 SYSTEM 1	24
2.4 O FUTURO DOS GÊMEOS DIGITAIS.....	30
3 DESENVOLVIMENTO.....	31
3.1 O PROCESSO DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO	31
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	39
4.1 ESTUDO DAS POSSÍVEIS CAUSAS BÁSICAS	40
4.2 TESTES REALIZADOS NO EQUIPAMENTO.....	44
4.2.1 Aumento de Viscosidade do Óleo Lubrificante	44
4.2.2 Redução da Temperatura do Ar na Entrada do Soprador	46
4.2.3 Soluções Propostas	48
5 CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIAS.....	53
GLOSSÁRIO.....	57

1 INTRODUÇÃO

Tecnologias digitais aplicadas na indústria datam do final da década de 60, quando surgiram os primeiros Controladores Lógicos Programáveis (CLP). Tais controladores foram criados com a intenção de substituir os complexos e problemáticos painéis de relés, utilizados até então como forma de controle de plantas e equipamentos industriais (SEGOVIA; THEORIN, 2012).

Esta invenção marcou o início do que hoje é conhecido como terceira revolução industrial, caracterizada pela introdução dos computadores e da informática na indústria (OTT; SNIDERMAN, 2016), juntamente com a robótica que já vinha se desenvolvendo desde o início da mesma década (FAUST, 2007).

Recentes avanços na capacidade de processamento dos computadores, armazenamento de dados e velocidade de transmissão destes dados, impulsionaram o surgimento de novas tecnologias tais como *Machine Learning* (ou aprendizado de máquina), conectividade, *Big Data* (dados massivos), computação em nuvem e *Internet of Things* (IoT). Estas tecnologias são hoje consideradas como viabilizadoras de uma nova revolução industrial, conhecida como Indústria 4.0 (OTT; SNIDERMAN, 2016).

Indústria 4.0 é definida pela combinação de tecnologias físicas e digitais como processos produtivos mais avançados, robótica, inteligência artificial e IoT, criando uma empresa digital, interconectada, autônoma e capaz de comunicar-se em tempo real, tomando decisões automaticamente se necessário ou até mesmo fornecendo dados suficientes para o balizamento de decisões que serão aplicadas novamente ao nível físico. Tal concepção permite a integração entre fábrica, fornecedores, força de trabalho e consumidores. Embora tenha sua origem na manufatura, o conceito de Indústria 4.0 vai além disso. Trata-se de uma mudança na forma como os produtos são projetados, utilizados e mantidos (COTTELEER; SNIDERMAN, 2017).

O conceito de gêmeos digitais surge juntamente com esta nova perspectiva tecnológica, visando trazer para um ambiente digital, uma cópia do mundo real, permitindo que se analise vários aspectos de um objeto, um equipamento, um processo ou até mesmo uma planta industrial em sua totalidade, testando cenários e possibilidades antes de implementá-las em sua cópia física, tornando as tomadas de decisões mais rápidas, eficientes e baratas (MUSSOMELI et al., 2018).

Este trabalho tem por objetivo explorar o conceito teórico sobre gêmeos digitais e apresentar soluções disponíveis atualmente. Por fim, exemplificar com um estudo de caso como esta tecnologia foi útil na identificação e planejamento de manutenção de um equipamento industrial.

1.1 PROBLEMA

O estudo de caso será realizado em uma unidade de craqueamento catalítico fluidizado (FCC) de uma refinaria no Brasil.

O craqueamento catalítico fluidizado é o processo mais utilizado mundialmente para a conversão de frações pesadas da destilação de petróleo em frações mais leves e nobres como a gasolina e o gás liquefeito de petróleo (GLP) (QUELHAS et al., 2014 apud GARY; HANDWERK, 2001). O nome do processo leva em consideração a utilização de um catalisador que se assemelha a um pó muito fino que, quando adicionado ar ou vapor, se comporta como um fluido líquido. Este catalisador é aquecido a altas temperaturas e colocado em contato com o óleo pesado, promovendo a quebra das cadeias carbônicas ali presentes em moléculas menores, por consequência, produzindo derivados de maior valor comercial (QUELHAS et al., 2014).

O catalisador utilizado no processo necessita ser regenerado após passar por um ciclo de reação. Isto é realizado através da injeção de oxigênio dentro do reator, que é obtido no ar atmosférico.

O ar que é colocado em contato com o catalisador é fornecido por outro equipamento, um soprador de ar, que é responsável por captá-lo da atmosfera, comprimi-lo e direcioná-lo para dentro do conjunto.

Este soprador de ar é um equipamento crítico para o funcionamento da unidade de FCC e por consequência para a refinaria. Uma parada deste equipamento por avaria mecânica resulta em prejuízo financeiro de grande monta que vai além do próprio custo da manutenção. O lucro cessante além de rearranjos logísticos para evitar o desabastecimento do mercado, muitas vezes representam um prejuízo maior do que o custo de manutenção do próprio equipamento.

Como o soprador de ar opera em tempo integral e suas paradas de manutenção são programadas para campanhas de até 5 anos, é importante um acompanhamento

constante do estado da máquina. Este acompanhamento é realizado por inspeções visuais de rotina, medições de temperaturas, vibrações, pressão e deslocamento axial do eixo do equipamento. No entanto, informações coletadas localmente não são suficientes para uma visão instantânea da saúde da máquina pois dependem de uma compilação manual por um engenheiro especializado, levando em conta todo o histórico desde a entrada em operação até o momento em que os dados foram coletados.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho, relativos ao problema anteriormente apresentado.

1.2.1 Objetivo Geral

Apresentar uma solução de contorno que visa prolongar a vida útil do soprador de ar da unidade de FCC da refinaria, através da implantação e uso de um gêmeo digital.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo geral neste trabalho de conclusão de curso os seguintes objetivos específicos serão abordados:

- Explorar o conceito de gêmeos digitais e sua utilidade para embasar decisões técnicas, econômicas e produtivas de uma empresa.
- Apresentar a plataforma *System 1* da GE e explicar como ela se encaixa no conceito de gêmeos digitais.
- Mostrar aspectos técnicos da implantação da plataforma *System 1* no soprador da unidade de craqueamento catalítico da refinaria.
- Identificar, através das informações fornecidas pelo gêmeo digital do soprador, uma potencial falha mecânica da máquina.
- Análise do problema de deslocamento axial do eixo do soprador.

- Discutir como as informações obtidas pelo gêmeo digital da máquina possibilitaram chegar a uma solução de contorno para a potencial avaria detectada.

1.3 JUSTIFICATIVA

A importância da manutenção preditiva para a indústria reside na possibilidade de antever situações indesejadas, paradas de equipamentos, perda de produção e possibilitar que as equipes técnicas estejam preparadas para atuar no momento mais oportuno para o negócio.

O que os gêmeos digitais representam é a possibilidade de olhar para o equipamento e ver além do que os sentidos humanos são capazes de descrever. Eles se propõem a trazer informações relevantes sobre o objeto para um ambiente virtual, no qual análises e testes são realizados por algoritmos computacionais que traçam um perfil evolutivo do equipamento, destacando tendências que podem ser maléficas e suas causas, prevendo situações antes que elas ocorram.

O soprador da unidade de FCC é um equipamento de grande importância para o negócio da refinaria e por isso considerado crítico. Sendo assim, é desejado que exista um acompanhamento em tempo real desta máquina, que possa fornecer informações técnicas a respeito do estado de saúde do equipamento e que se possa prever a vida útil não só da máquina como um todo, mas de seus componentes principais, evitando paradas não programadas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia está dividida em 5 (cinco) partes. Neste primeiro capítulo, foi introduzido o tema do trabalho, sua relevância para a indústria e como ele se encaixa dentro do contexto da Indústria 4.0.

No segundo capítulo será abordado em maior profundidade a conceitualização do tema gêmeos digitais.

No terceiro capítulo, serão apresentadas mais informações sobre o equipamento soprador de ar da refinaria e sobre como esta máquina recebeu uma importante atualização tecnológica que viabilizou a criação de seu gêmeo digital.

No quarto capítulo, será apresentado um estudo de caso real, onde o gêmeo digital possibilitou a antecipação a um problema mecânico do equipamento.

Por fim, na conclusão serão retomados os pontos principais do trabalho e os objetivos atingidos por ele.

2 GÊMEOS DIGITAIS

2.1 O QUE SÃO GÊMEOS DIGITAIS

O criador do termo “gêmeo digital” foi o Dr. Michael Grieves, em 2003, na Universidade de Michigan, no curso ministrado por ele sobre gerenciamento do ciclo de vida de produto (PLM) (GRIEVES, 2014). O conceito é amplo e pode ser aplicado a todas as fases do ciclo de vida de um produto ou objeto físico, desde o protótipo, passando pela fabricação até a operação, avaliando sua performance e desgaste no mundo real. Embora o foco deste trabalho esteja na sua aplicação na etapa de operação e manutenção do produto, é importante que se discuta o potencial desta tecnologia nas demais fases.

Gêmeos digitais podem ser definidos como um modelo digital de um objeto real, que representa sua configuração física com riqueza de detalhes suficiente ou até mesmo com simplificações pertinentes, alimentado por dados de sensores, o que ilustra a situação instantânea deste objeto no mundo real (PARROT; WARSHAW, 2017). Um gêmeo digital pode representar um ativo individual, um sistema composto por ativos diferentes ou um conjunto de vários ativos idênticos.

De acordo com (GE, 2018a), os três elementos que compõem um gêmeo digital são:

- Modelo do ativo: Descreve detalhadamente sua estrutura e componentes, de forma hierarquizada.
- Análises: Preveem e descrevem seu comportamento, possibilitando a automatização de comportamentos.
- Base de Conhecimentos: Dados acumulados a partir da captação de variáveis relacionadas ao ativo do mundo real, apresentados de forma intuitiva.

Além da representação instantânea, os dados obtidos no mundo físico possibilitam um traçado do perfil evolutivo do objeto em um ambiente digital que provê informações importantes acerca de sua performance, resultando em ações de volta para o mundo real, como mudanças de estratégia, design ou no processo fabril (REID; RHODES, 2016). Este conceito aplica-se a todas as fases do ciclo de vida do produto, desde sua conceitualização na fase de projeto, passando pela fabricação até a

utilização. Em cada fase, o gêmeo digital provê informações que subsidiam tomadas de decisão que implicam em mudanças no objeto físico, visando sua otimização.

Durante a fase de projeto, os gêmeos digitais podem ser utilizados na forma de modelos simplificados para testar virtualmente características físicas do produto, sem se importar com a complexidade total deste item após acabado (GRIEVES, 2014). Eles são capazes de substituir etapas de prototipagem por simulações computacionais, provendo informações para tomada de decisões.

Casos de uso de simulação computacional em substituição a protótipos reais não são novidade na indústria. Segundo Emilio Abud Filho (2018), “Simulação computacional é a forma mais eficiente, rápida, barata e eficaz de se fazer projetos” (ABUD FILHO, 2018). A simulação digital permite uma análise criteriosa das características que se pretende obter do objeto e, quando for necessário, chegar a um protótipo físico mais próximo do que se almeja como resultado final, eliminando custos de tentativas malsucedidas e gasto de tempo.

Como resultado desta etapa, obtêm-se economia de recursos, eliminação de processos ou peças ineficientes, e uma ideia mais clara sobre o resultado final. Nesta fase, o modelo digital possibilita ainda que as análises computacionais feitas sobre o mesmo resultem em informações úteis à fabricação do item, tais como lista de processos ou o passo a passo da sua confecção, lista de materiais, custos e especificações técnicas, basicamente mostrando como fabricar aquele produto da melhor forma, diminuindo desperdícios e possíveis falhas (GRIEVES; THOMAS, 2015).

Na fase seguinte, a fabricação, o gêmeo digital fornece informações segmentadas e adequadas para cada etapa do processo construtivo. Neste momento, o modelo digital não está mais rodando simulações, mas sim refletindo no mundo virtual o que está realmente acontecendo no chão de fábrica. Ele passa a ser realimentado com informações físicas capturadas por meio de sensores, como torque de parafusos, dimensões, análises de materiais, dentre outras (GRIEVES, 2014). A própria linha de montagem tem o seu gêmeo digital, fornecendo informações instantâneas sobre a produção, consumo de matéria prima, performance, detecção de avarias, dentre outras, além de possibilitar que cada célula da produção se comunique uma com as outras, adaptando-se às características do produto (GRIEVES; THOMAS, 2015).

A Figura 1 exemplifica com uma linha de montagem automotiva como funciona a troca de informações nesta etapa. Cada veículo que entra em produção tem características específicas. As informações sobre estas características são alimentadas no sistema a partir de seu respectivo gêmeo digital da etapa conceitual. Cada robô da linha poderá atuar de forma diferente para cada produto que chega em sua estação, ao invés de simplesmente repetir movimentos constantemente. As informações coletadas sobre a atuação destas mesmas estações são enviadas de volta ao gêmeo digital do veículo fornecendo dados sobre seu estado atual.

Figura 1 - Gêmeos digitais aplicados a uma linha de produção



Fonte: Grieves (2014).

Quaisquer mudanças realizadas neste processo como novas especificações, adaptações, dentre outras, são enviadas de volta ao gêmeo digital, para que este reflita o produto como ele realmente está tomando forma no mundo físico, gerando mais dados que tornam mais rápidas as tomadas de decisões sobre o processo de engenharia do produto.

Durante a fase de operação e manutenção, as vantagens da utilização de um gêmeo digital podem se tornar bem evidentes. As características de performance do objeto são monitoradas em tempo real, provendo ao usuário uma fotografia instantânea sobre aquele produto. Além disso, análises podem ser realizadas pelo uso de informações armazenadas ao longo do tempo que permitem traçar um perfil evolutivo do objeto e seu comportamento (PARROT; WARSHAW, 2017). Nesta fase

é possível detectar problemas de performance, comparar seu desempenho com o que era esperado dele e obter informações preditivas relacionadas a manutenção e operação, permitindo também uma visão sobre o futuro do equipamento.

O uso das informações coletadas neste processo possibilita a detecção de avarias antes que elas ocorram e, conseqüentemente, subsidiam tomadas de decisões que possibilitam mitigar ou minimizar as conseqüências destas falhas. A ideia é não apenas adquirir dados massivos de sensores espalhados pelo sistema, mas tornar dados visíveis de maneira que se possa tomar decisões mais rapidamente (GRIEVES; THOMAS, 2015).

A coleta de informações ao nível físico é viabilizada pela utilização de uma diversidade de sensores, espalhados pelo chão de fábrica, cada qual responsável por prover ao sistema um conjunto de informações a respeito de uma variável física, normalmente associada a um equipamento ou etapa do processo produtivo, por exemplo, pressão, temperatura, medição de espessura, dentre outras. Juntamente com estes sensores, conectam-se atuadores, ou dispositivos capazes de causar alguma alteração no meio físico como motores, cilindros pneumáticos, válvulas, impressoras 3D, robôs, etc. A comunicação entre sensores (provedores de informação) e dispositivos que utilizam as informações produzidas, sejam atuadores, computadores ou usuários, ocorre por uma rede, baseada em arquiteturas abertas como *ethernet* e IP, que interconecta todo este conjunto. Dentro do paradigma da Indústria 4.0, esta rede chama-se *Industrial Internet* (ou *Internet Industrial*), e o conjunto de dispositivos (sensores e atuadores) é nomeado *Industrial Internet of Things* (IIoT) (MADEIRA, 2016).

Uma vez digitalizado, as ações executadas no objeto físico também são realimentadas para o gêmeo digital, tais como manutenções, mudanças de especificações, substituição de peças, de tal forma que possa se obter uma representação fiel do equipamento. Assim, ao interagir com o gêmeo digital, pode-se ter uma comparação dos estados “conforme construído” versus “conforme mantido” (PARROT; WARSHAW, 2017).

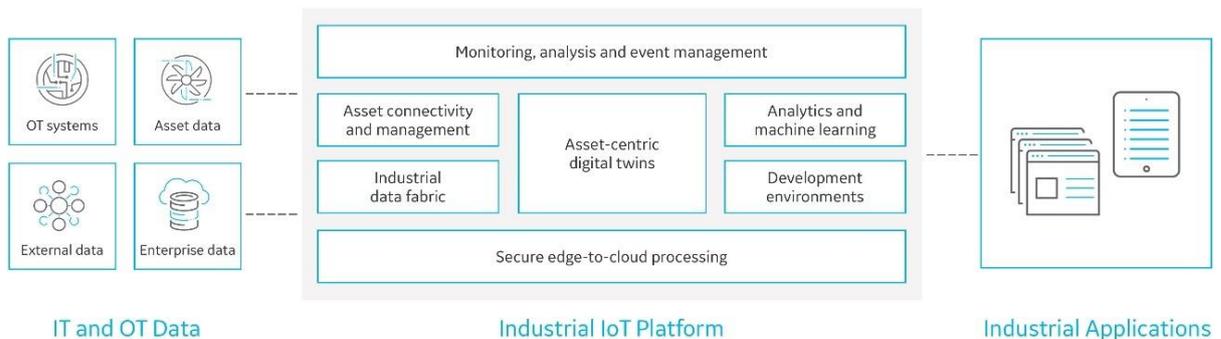
Embora algumas funcionalidades mencionadas neste tópico ainda existam apenas conceitualmente, soluções focadas para fases específicas do ciclo de vida de produtos já estão disponíveis no mercado atualmente. O capítulo seguinte explora algumas destas opções.

2.2 O QUE O MERCADO JÁ OFERECE

Soluções computacionais para o monitoramento de ativos industriais já existem a algum tempo. No entanto, algumas empresas do segmento de tecnologia estão desenvolvendo soluções integradas dentro dos conceitos de gêmeos digitais e IoT. É o caso por exemplo da *General Electric* (GE) que criou uma subsidiária voltada para a pesquisa e desenvolvimento de soluções específicas para o segmento digital da Indústria 4.0, a *GE Digital* (GEDIGITAL, 2018).

Dentro destes conceitos, a empresa criou o *Predix*, uma plataforma capaz de integrar *Machine Learning*, *Big Data* e internet industrial, tendo como foco central o gêmeo digital. A plataforma combina dados adquiridos do processo industrial, dos sensores instalados no próprio ativo e dados coletados externamente, com informações corporativas, possibilitando realizar análises e predição de avarias, além de também traçar cenários com possíveis soluções para os problemas detectados, considerando o custo-benefício de cada opção (PARRIS, 2016). A arquitetura conceitual da plataforma está ilustrada pela Figura 2.

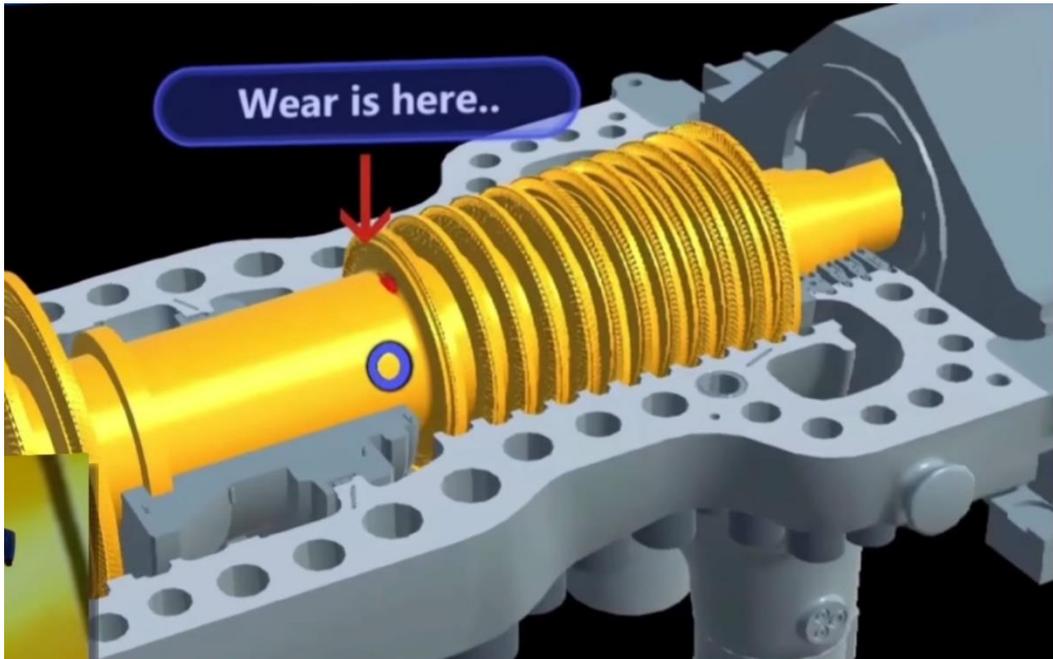
Figura 2 - Plataforma Predix da GE Digital



Fonte: Gedigital (2018).

Avárias detectadas no sistema são exibidas em tempo real para o operador ou engenheiro do sistema no próprio gêmeo digital de forma intuitiva, possibilitando um melhor entendimento da situação. A Figura 3 ilustra uma situação real onde o gêmeo digital detectou um desgaste excessivo em um eixo de uma turbina a vapor, exibindo na tela o ponto mais provável da avaria, facilitando a tomada de decisão para o corpo técnico da empresa.

Figura 3 - Gêmeo digital de uma turbina na plataforma Predix da GE Digital



Fonte: Parris (2016).

A plataforma *Predix* representa um exemplo do que há de mais atual já disponível no campo de gêmeos digitais. No entanto, soluções semelhantes existem desde antes da disseminação do termo “gêmeo digital”. É o caso por exemplo da plataforma *System 1*, desenvolvido inicialmente pela empresa *Bently Nevada*, e adquirida pela GE em 2002. Esta plataforma desempenha as principais funções esperadas de um gêmeo digital, no entanto, dedicado à fase de manutenção e operação do sistema e é especializada em máquinas rotativas, como bombas, compressores, turbinas, dentre outros. Além disso, foi desenvolvida pensando em ativos já prontos, ou seja, fabricados antes do conceito de modelo digital.

O que o *System 1* faz basicamente é permitir que um equipamento físico existente, construído com pouca ou nenhuma tecnologia de monitoramento de campo, seja atualizado por meio de inserção de novos sensores. Uma réplica tridimensional deste equipamento é então construída em uma plataforma digital e tem o monitoramento de seus componentes associados com as medidas coletadas automaticamente em campo (GE, 2008a). A partir desta implementação, podem ser configurados limites de tolerância para variáveis críticas, dados históricos que permitem o acompanhamento do estado do ativo, além da centralização de informações técnicas como desenhos de peças, especificações, laudos, informações

coletadas externamente, dentre outras, tudo em uma base de dados centralizada. A Figura 4, ilustra o funcionamento desta plataforma.

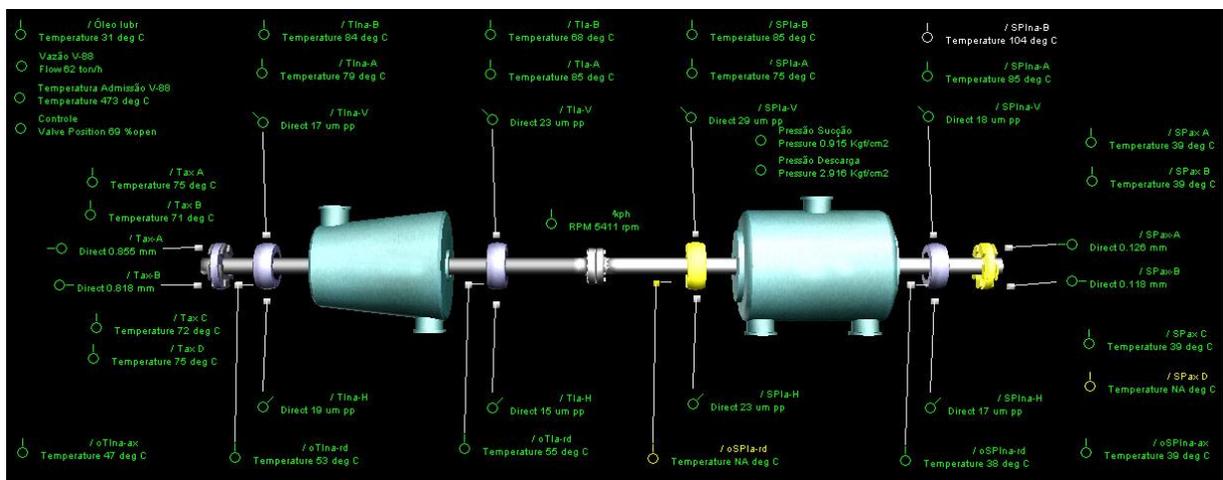
Figura 4 - Plataforma System 1 da GE / Bently Nevada



Fonte: Ge (2008a).

Como resultado final, obtêm-se uma cópia virtual do equipamento, com uma fotografia instantânea e interativa de seu estado físico, provendo informações importantes tanto à operação do sistema como à manutenção e otimização deste. Um exemplo do aspecto da visualização deste modelo virtual do equipamento pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5 - Conjunto Soprador + turbina visualizado pelo System 1



Fonte: Autoria própria.

Além da GE, que basicamente possui seu foco na fase de operação e manutenção de ativos, outros fabricantes de tecnologia já dispõem de produtos voltados ao conceito de gêmeos digitais. É o caso por exemplo da *Dassault Systems*, empresa do segmento de softwares do tipo *Computer Aided Design* (CAD), que atualmente oferece ferramentas para o conceito de gêmeos digitais, focadas nas fases de projeto, prototipagem e fabricação (DASSAULT, 2018). É o caso da plataforma *3DEXPERIENCE* (Figura 6), que disponibiliza um ambiente unificado de dados de engenharia de produto, pesquisa, negócios e documentação, em uma nuvem computacional que pode ser privada ou pública, permitindo que todos os envolvidos na fase de projeto de um ativo tenham acesso imediato a informação, à medida em que estas são alimentadas ou alteradas (KAHN, 2017).

Figura 6 - Plataforma 3DEXPERIENCE da Dassault Systemes



Fonte: Dassault (2018).

2.3 SYSTEM 1

O objetivo da plataforma *System 1* da GE é obter informações de campo de ativos monitorados, compilando estes dados numa base histórica, permitindo detectar tendências indesejadas, antecipando falhas antes que elas ocorram. As informações são obtidas por meio de sensores instalados no equipamento. A frequência de aquisição destes dados pode variar de acordo com sua criticidade (GE, 2008a).

Equipamentos considerados críticos são monitorados em tempo real, por meio de sensores conectados a um *rack* instalado próximo a eles, chamado Sistema de Monitoramento 3500, fabricado pela *Bently Nevada*, ilustrado pela Figura 7. Este *rack* recebe medições constantes, em tempo real da máquina, compila os dados e os disponibiliza, via rede *ethernet* para o servidor, que pode estar instalado em uma localização remota. Além da simples aquisição de dados, este *rack* também é responsável pela proteção da máquina, podendo atuar no desligamento de emergência desta, caso algum valor limite, considerado perigoso, seja alcançado (GE, 2008b).

Figura 7 - Rack do sistema 3500 da Bently Nevada



Fonte: Ge (2008b).

O *rack* 3500 é um sistema modular, ou seja, módulos específicos podem ser montados dependendo da necessidade da máquina a ser monitorada. Cada módulo é associado a um conjunto de sensores que são ligados a este, a Figura 8 ilustra um exemplo de módulo de sensores de proximidade ou sensores sísmicos, que podem ser utilizados para monitoramento de vibração, posição, empuxo, dentre outras. Outros tipos de sensores podem ser adicionados ao sistema como sensores de temperatura e pressão. Adicionalmente, módulos de saída são adicionados também ao *rack*. Estes módulos possuem relés internos que são configurados logicamente por meio de um software específico e visam realizar as funções de proteção da máquina.

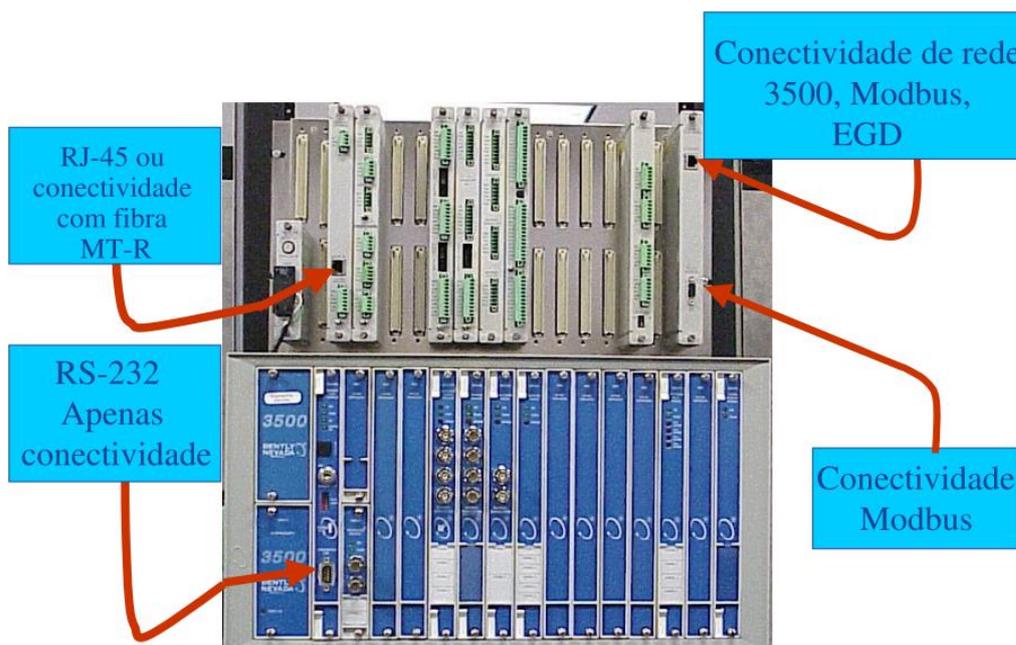
Figura 8 - Módulo de sensores sísmicos do Rack 3500



Fonte: Ge (2008b).

Estão presentes também no *rack*, módulos de comunicação, responsáveis por disponibilizar os dados adquiridos através dos sensores à rede *ethernet*, que pode ser a internet industrial, via cabo UTP ou fibra ótica, através de conectores RJ-45 ou MT-RJ, respectivamente, conforme ilustra a Figura 9. Vários *racks* podem estar conectados a esta rede, sendo que cada um terá um respectivo endereço IP. É por meio desta rede que os dados de diversos ativos serão consultados pelos servidores do sistema e armazenados em uma base de dados centralizada.

Figura 9 - Interfaces de comunicação do Rack 3500



Fonte: Ge (2008b).

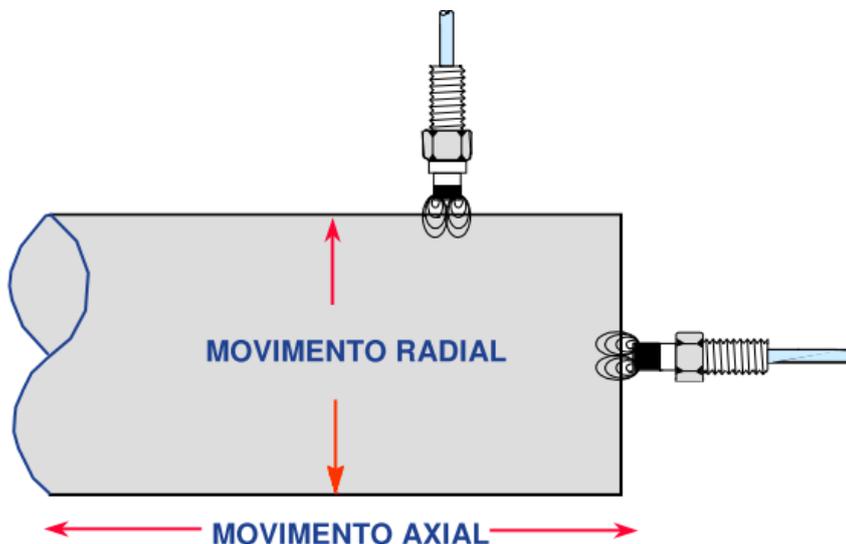
As medições físicas são feitas por meio de sensores instalados diretamente no equipamento. O conjunto sensor/transdutor de proximidade exibido na Figura 10, por exemplo, gera um sinal elétrico de tensão proporcional à distância a que se encontra de uma superfície condutora. Isto é obtido por meio de uma rádio frequência (RF) gerada pelo módulo transdutor. Por meio deste princípio de funcionamento, pode-se obter medidas importantes para o diagnóstico da máquina, como medir vibrações, deslocamentos de componentes da máquina, dentre outras conforme seu posicionamento no equipamento, como ilustra a Figura 11.

Figura 10 - Sensor e transdutor de proximidade



Fonte: Ge (2008b).

Figura 11 - Uso do sistema do transdutor de proximidade



Fonte: Ge (2008b).

O software da plataforma System 1 é composto por três módulos primários:

- Configuração;
- Aquisição de dados;
- Exibição.

O módulo de configuração é responsável por criar uma base de dados de todos os ativos monitorados de uma planta industrial, aqui chamada de *Enterprise*. Uma *Enterprise* pode obter dados de até 10 servidores de aquisição de dados, que por sua vez, podem obter informações de até 2500 pontos de medição em tempo real cada um (GE, 2008a). Este banco de dados não armazena valores, ele apenas relaciona componentes do modelo digital da planta com instrumentos no mundo físico.

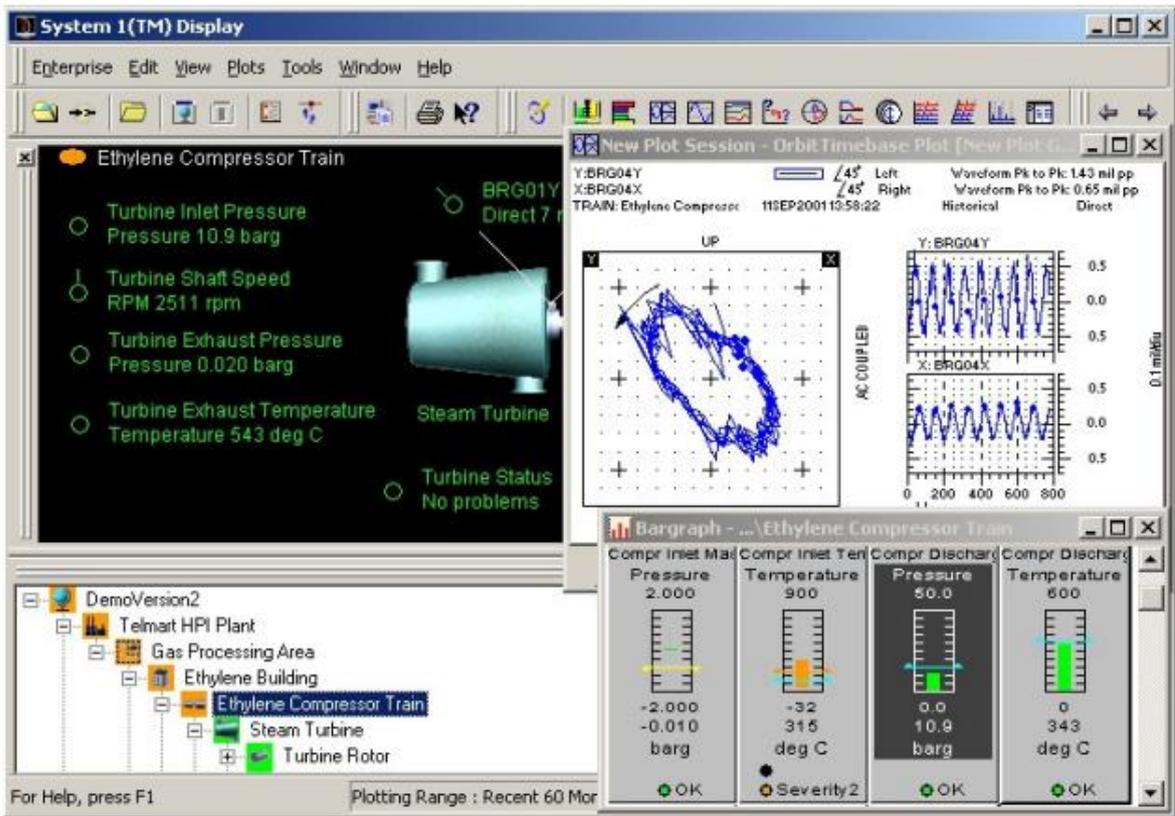
Um segundo banco de dados também é criado pelo módulo de configuração, chamado banco de dados histórico, sendo este o responsável por armazenar os valores das medições realizadas em cada ponto de monitoramento, proporcionando informações que permitem traçar o perfil evolutivo de cada equipamento.

O módulo de aquisição de dados é o responsável por comunicar-se com cada equipamento (*rack*) disponível na rede, coletando dados dos pontos configurados em cada um, trazendo estas informações para o banco de dados histórico. Também realiza funções como identificar novos *racks* conectados à rede, atribuir um endereço IP a estes *racks* e verificar o estado (*Online / Offline*) de cada um deles.

O módulo de exibição recebe o nome de *System 1 Display* e possibilita a visualização, de forma intuitiva, dos valores em tempo real e também histórico, dos modelos digitais criados via módulo de configuração. A Figura 12 ilustra a aparência deste módulo. É neste módulo que o usuário final pode interagir com o gêmeo digital de cada ativo monitorado pelo sistema.

O *System 1 Display* pode ser instalado em qualquer computador conectado à internet industrial. Algumas implementações possibilitam ainda sua visualização em nuvem privada, a partir de qualquer computador conectado à rede corporativa da empresa.

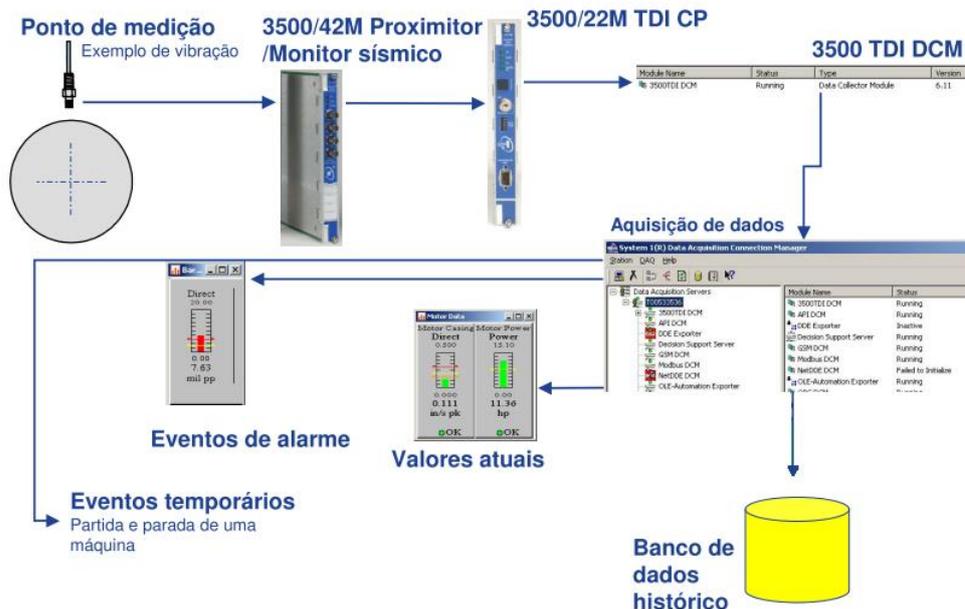
Figura 12 - Tela do System 1 Display



Fonte: Ge (2008a).

A Figura 13 ilustra de forma resumida o fluxo de dados desde o sensor instalado na máquina até sua exibição no System 1 Display.

Figura 13 - Fluxo de dados da plataforma System 1



Fonte: Ge (2008a).

2.4 O FUTURO DOS GÊMEOS DIGITAIS

As soluções apresentadas neste capítulo não encerram as possibilidades para o conceito de gêmeos digitais. Muito ainda está sendo estudado a respeito e novas aplicações estão sendo desenvolvidas. Por exemplo, em outubro de 2018, a Siemens (empresa alemã líder nos segmentos de telecomunicações, automação, eletricidade e software) anunciou a aquisição da Electrocon International Inc (EII), uma empresa do segmento de softwares de proteção de sistemas elétricos. A intenção da Siemens é aumentar o investimento no desenvolvimento de gêmeos digitais voltados para sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica (SIEMENS, 2018).

De acordo com Gartner, uma empresa de pesquisa na área de TI, é previsto que até 2021 metade das grandes indústrias usarão gêmeos digitais em alguma etapa de seus processos ou ativos de suas plantas (PETTEY, 2017). Pequenas e médias empresas também serão atingidas por esta tendência, uma vez que softwares de engenharia e desenvolvimento de produtos já estão incorporando os benefícios da simulação digital, antecipando seu uso em conjunto com gêmeos digitais. Estima-se que em um futuro não muito distante, desde pequenos dispositivos como sensores até os mais complexos como veículos e plantas industriais terão um gêmeo digital associado a pelo menos uma etapa do seu ciclo de vida.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 O PROCESSO DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO

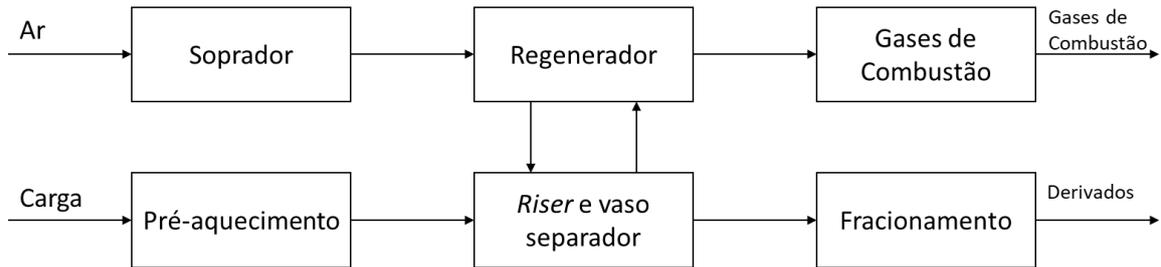
Unidades de craqueamento catalítico fluidizado (FCC) são responsáveis por grande parte da produção de gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, diesel, gás combustível e óleo combustível em refinarias. O nome do processo se deve ao uso de um catalisador na forma de um pó fino que se comporta como um fluido quando adicionado ar ou vapor. Neste processo, a carga é composta por frações pesadas¹ provenientes do processo inicial de destilação do petróleo.

A carga é inicialmente pré-aquecida e depois direcionada a um reator na forma de um tubo vertical de grande diâmetro, chamado *riser*. Dentro deste reator, a carga entra em contato com o catalisador fluidizado a uma alta temperatura, cerca de 650°C a 710°C (QUELHAS et al., 2014). Este contato promove a quebra das moléculas grandes em outras menores, produzindo derivados mais leves que saem pela parte superior, na forma gasosa. As frações mais pesadas permanecem impregnadas ao pó do catalisador e precisam ser removidas para que este recupere sua capacidade reativa.

A saída do *riser* é conectada a outro equipamento, chamado vaso separador, onde o pó de catalisador é separado dos derivados que seguem para uma torre fracionadora, onde são retirados os produtos deste processo. O catalisador, por sua vez, desce para um terceiro equipamento chamado regenerador, onde entra em contato com oxigênio que promove uma queima controlada do óleo e do coque que estão impregnados neste, assim recuperando sua capacidade reativa, reaquecendo-se à temperatura de reação e retornando ao início do processo. O oxigênio necessário para a queima do catalisador é fornecido por um soprador que capta o ar atmosférico, comprime e direciona para o interior do regenerador. A Figura 14 exibe um diagrama simplificado do funcionamento do processo.

¹Chama-se fração pesada aquela que, em uma coluna de destilação, concentra-se no fundo desta. São óleos de maior viscosidade, compostos de moléculas com maior número de átomos de carbono.

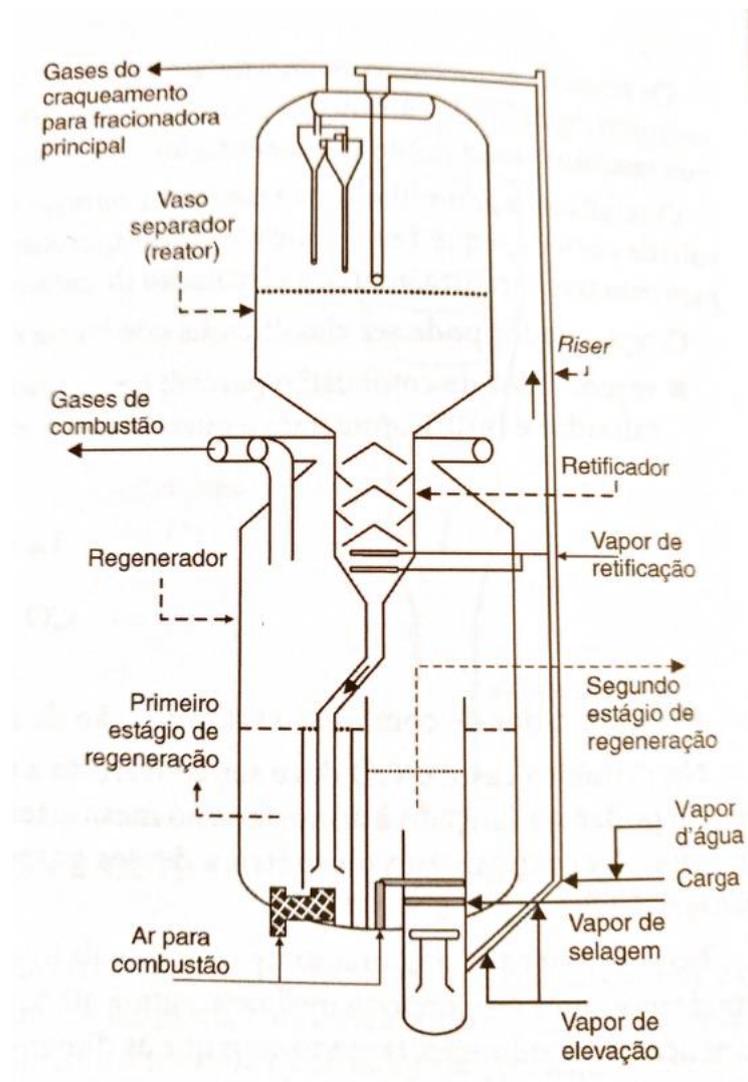
Figura 14 - Diagrama de blocos simplificado do processo de FCC



Fonte: Autoria própria.

O conjunto formado pelo *riser*, vaso separador e regenerador é chamado conjunto conversor, que pode ser visualizado no diagrama esquemático da Figura 15.

Figura 15 - Desenho esquemático de um conjunto conversor

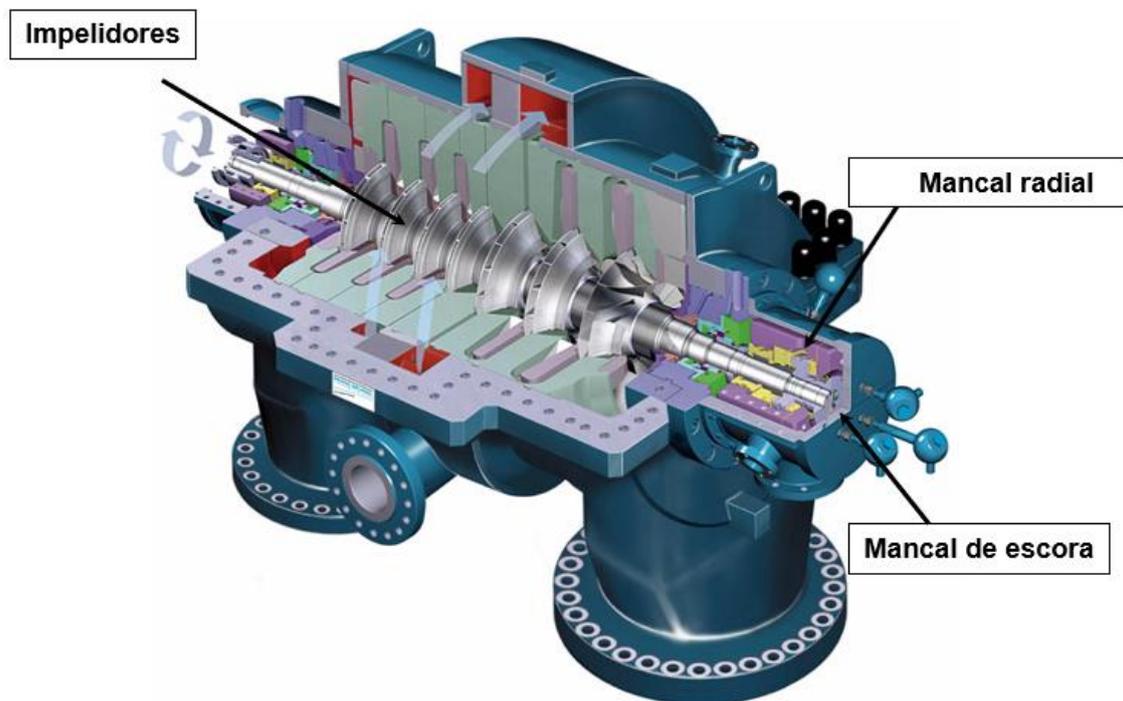


Fonte: Quelhas et al. (2014).

Como a queima do resíduo impregnado do catalisador é ao mesmo tempo responsável pela sua reativação e também pelo fornecimento de temperatura para a reação, sua interrupção tem por consequência a parada total do conjunto conversor. Sendo assim, o soprador de ar é um equipamento fundamental para o processo. Uma parada deste equipamento implica em interrupção da produção, prejuízo financeiro por conta de lucro cessante, além de mobilização de mão de obra técnica para o condicionamento e parada do restante da unidade de produção.

O soprador de ar é um compressor centrífugo, normalmente composto por dois estágios, como o exibido pela Figura 16. A função deste equipamento é fornecer ar pressurizado a cerca de 4 kgf/cm² para o reator da unidade de craqueamento catalítico.

Figura 16 - Vista interna de um compressor centrífugo de dois estágios



Fonte: Compressors (2003).

Comumente, este equipamento é acionado por uma turbina a vapor de que opera a uma velocidade de cerca de 5120 rpm, em uma situação normal de operação, como a que é exibida pela Figura 17.

Figura 17 - Fotografia de uma turbina a vapor



Fonte: A autoria própria.

A parada do conjunto é feita pelo desarme de um sistema que mantém aberta a válvula principal de admissão de vapor para a turbina, chamada válvula garganta, que pode ser visualizada na Figura 18. Esta válvula é mantida aberta durante a operação do conjunto por meio de um pistão hidráulico ligado a um circuito de comando hidráulico junto à máquina. Do outro lado, existe uma mola que, caso falte pressão no circuito hidráulico, puxa a válvula para a posição fechada, causando a parada do equipamento.

Figura 18 - Válvula garganta



Fonte: A autoria própria.

Além da possibilidade de falha no circuito hidráulico, os seguintes eventos são monitorados eletronicamente e causam o desarme automático do sistema hidráulico:

- Temperatura muito alta na descarga do soprador;
- Temperatura muito alta no condensador;
- Nível muito baixo no tanque de óleo de segurança;
- Grande deslocamento axial do eixo da turbina;
- Grande deslocamento axial do eixo do soprador;
- Botão de parada de emergência no painel local;
- Botão de parada de emergência no painel Centro de Controle Local.

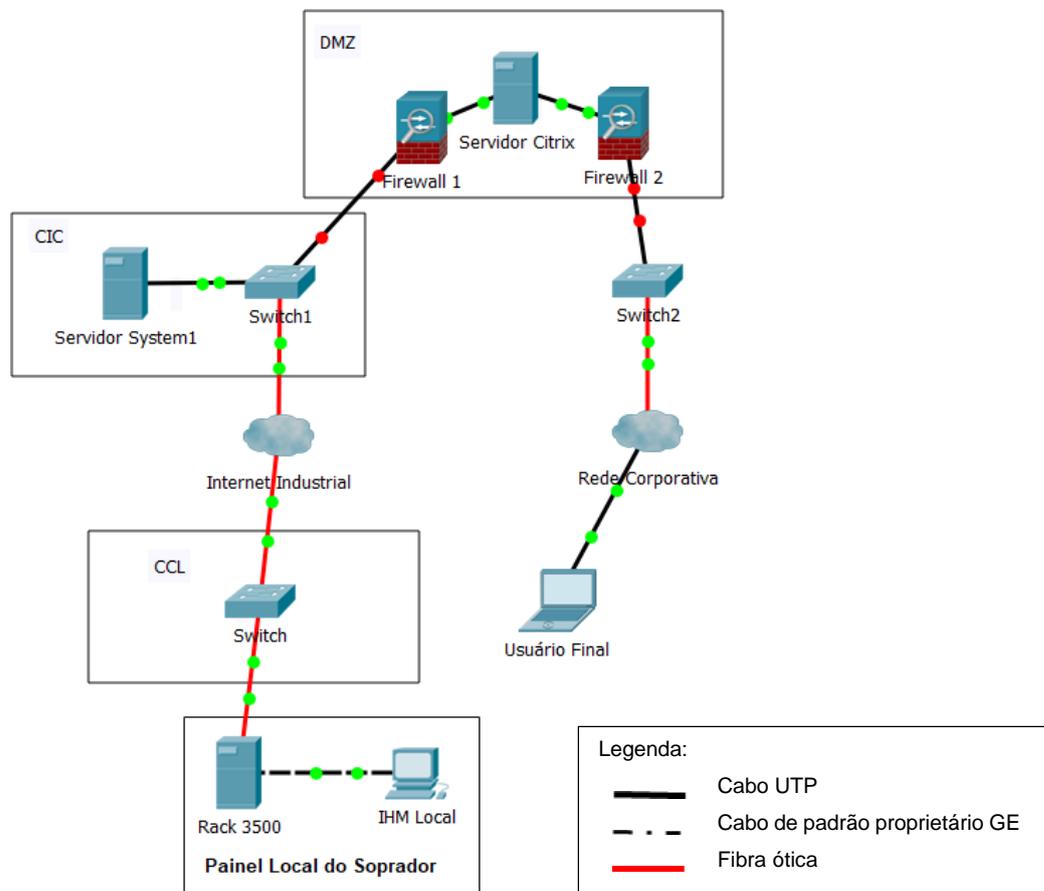
Por se tratar de uma máquina que opera ininterruptamente por longos períodos de tempo, desgastes são esperados em diversas peças do sistema, especialmente os mancais, responsáveis por apoiar o eixo rotativo da máquina sobre a carcaça que é fixa. Estas peças são inspecionadas e substituídas sempre que há uma parada, programada ou não, do equipamento. Um desgaste excessivo nesta peça provoca vibração e deslocamento no eixo, sendo que, quando o deslocamento atinge um limite considerado perigoso, a parada do conjunto é automaticamente acionada.

O presente estudo de caso foi realizado em uma refinaria no Brasil onde, em 2004, o conjunto formado pela turbina a vapor e soprador de ar recebeu novos sensores e um rack do sistema de monitoramento 3500 da *Bently Nevada*, juntamente com a plataforma *System 1* da GE, e assim a máquina passou a ter o seu modelo digital disponível para os técnicos e engenheiros da empresa. Tal atualização teve por objetivo aumentar o índice de disponibilidade do equipamento, melhorar o grau de automação, confiabilidade e a possibilidade de implementar sistemática de manutenção preditiva. A Figura 19 mostra a posição dos sensores instalados na turbina, enquanto que a Figura 20 ilustra a posição dos sensores de rotação em relação ao eixo da máquina.

o *backbone* da internet industrial da refinaria. Em uma localização remota, chamada centro integrado de controle (CIC), o servidor do *System 1* tem acesso a todos os equipamentos da plataforma instalados por toda a refinaria, através da internet industrial. Neste servidor, os dados são coletados e armazenados. Também é nele que fica o módulo *System 1 Display*, para acesso às informações.

Ainda no CIC, a internet industrial é interligada com a rede corporativa da empresa, por meio de uma zona desmilitarizada (DMZ). Nesta estrutura, um conjunto de *firewalls* numa configuração *back-to-back* protegem a internet industrial de acessos indevidos, oriundos da rede corporativa. Também é neste ambiente que se encontram os servidores Citrix, máquinas rodando o serviço *Citrix Virtual Apps and Desktops* da Citrix, responsáveis por virtualizar as aplicações da plataforma *System 1* e disponibilizá-las em uma nuvem corporativa, possibilitando que qualquer usuário da rede corporativa da empresa tenha acesso ao *System 1* desde que seja autorizado a isto. A Figura 21 ilustra de forma simplificada a estrutura da rede.

Figura 21 - Estrutura simplificada da rede do System 1

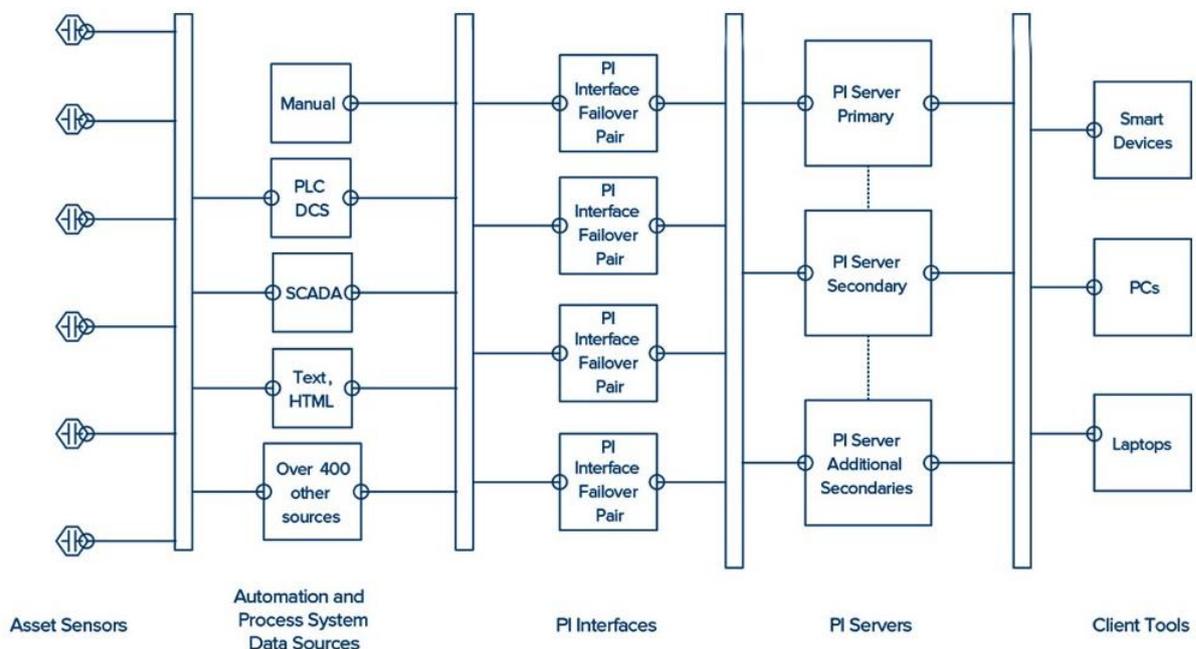


Fonte: Autoria própria.

Na DMZ também se encontram os servidores do *Plant Information System* ou simplesmente conhecido por *PI System* da Osisoft. Este sistema é responsável pela captura de dados de múltiplas fontes espalhadas pela planta industrial da refinaria, tais como CLP's, sistemas de controle, sistemas de monitoramento, instrumentos, dentre outros. As informações são transformadas em séries temporais e armazenadas em um banco de dados de longa duração. Desta forma, é possível acessar informações em tempo real ou dados históricos de qualquer equipamento a partir de qualquer computador ou dispositivo conectado à rede da empresa, local ou remotamente, cruzando informações de diferentes fontes para análises mais elaboradas.

O *PI System* permite que estas informações sejam visualizadas em um aplicativo próprio, via navegador de internet ou suíte *Office* da *Microsoft*, possibilitando elaboração de planilhas atualizadas instantaneamente com informações do processo. A Figura 22 ilustra a arquitetura básica deste sistema.

Figura 22 - Arquitetura básica do *PI System*

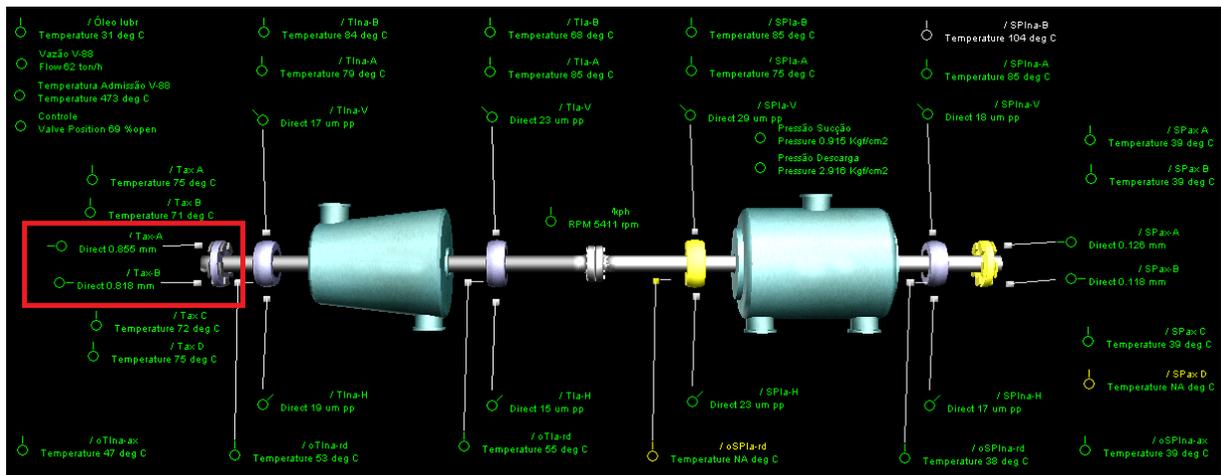


Fonte: Osisoft (2018).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

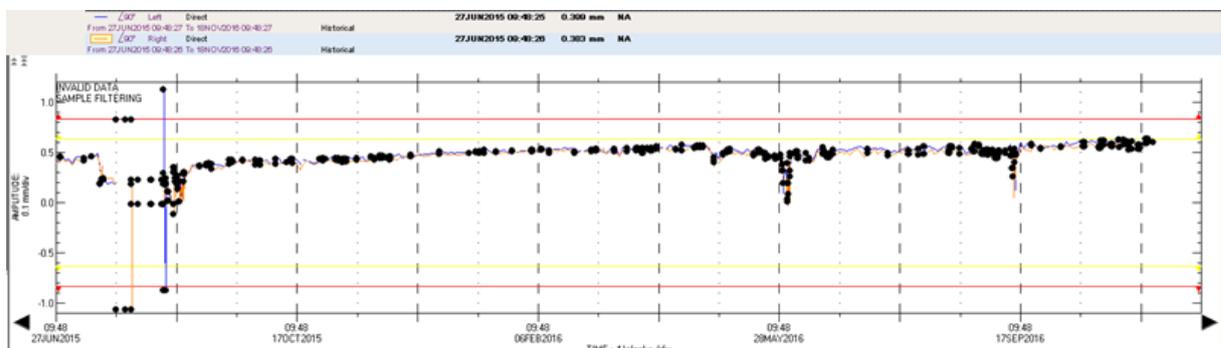
O conjunto de equipamentos formado pelo soprador e turbina passou por uma parada de manutenção programada em 2015, na qual foram substituídos os mancais, inspecionadas folgas mecânicas e calibrados todos os sensores. Após o retorno desta parada, foi detectado uma rápida evolução nas medições do deslocamento axial do eixo da turbina acionadora. Tal deslocamento foi acusado pelo par de sensores de proximidade 1A e 1B, ambos instalados na ponta do eixo, como mostra a Figura 23. A tendência pôde ser acompanhada pelo gêmeo digital da máquina, no *System 1*. O Gráfico 1 nos mostra o gráfico de tendência do deslocamento ao longo do tempo.

Figura 23 - Localização dos sensores



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 1 - Evolução do deslocamento axial desde Jun/15 até Nov/16



Fonte: Autoria própria.

A configuração original do conjunto *System 1* e *rack 3500* previa dois pontos de limites para o deslocamento do eixo: O primeiro situado em 0,63 mm (tanto no

sentido positivo quanto negativo) onde ocorreria o alarme de deslocamento alto, e o segundo ponto, situado a 0,83 mm (em ambos os sentidos), onde ocorreria o *trip* (ou desligamento automático) da máquina. Logo após o retorno da manutenção da máquina em setembro de 2015, o valor do deslocamento era de 0,40 mm. Em julho de 2017, este valor já se situava em torno de 0,72 mm.

Segundo a projeção feita ao se analisar o gráfico da medida, constatou-se que, mantida a taxa atual da evolução do deslocamento, a máquina atingiria a condição de *trip* em fevereiro de 2018, causando uma parada da unidade de craqueamento catalítico fluidizado.

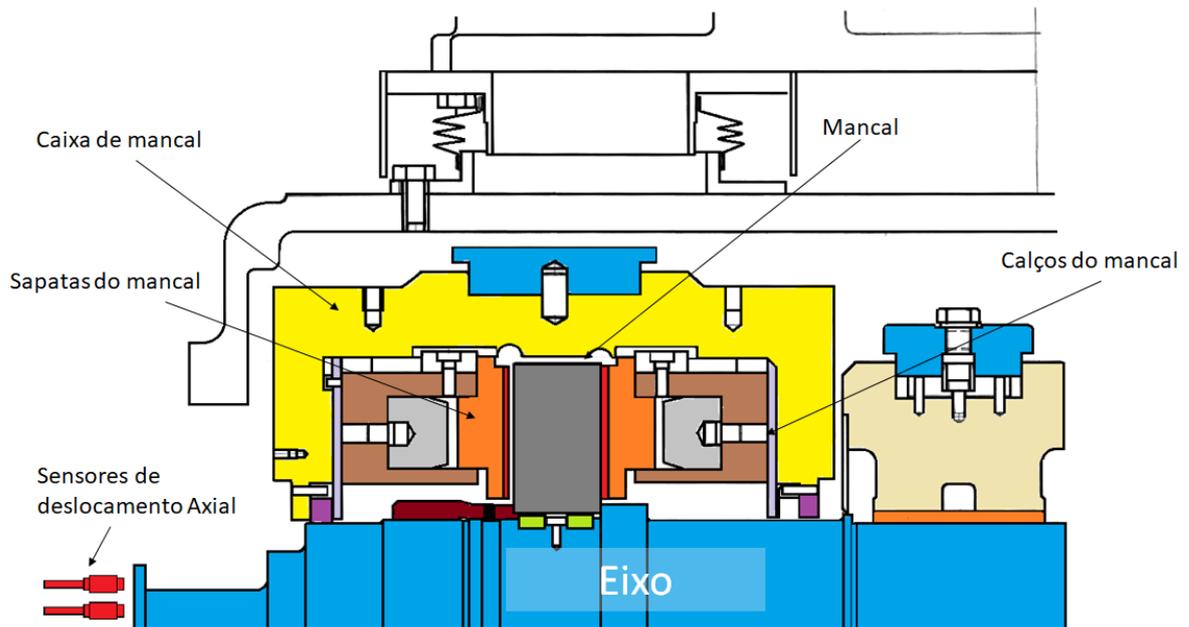
4.1 ESTUDO DAS POSSÍVEIS CAUSAS BÁSICAS

Constatado o problema, iniciou-se um grupo multidisciplinar para análise das possíveis causas. Foi elaborado uma árvore de falhas, considerando todas as possíveis hipóteses, apresentadas a seguir.

- a) Deslocamento da base de fixação dos sensores de proximidade 1A e 1B;
- b) Perda de sensibilidade dos sensores;
- c) Falha de calibração (ajuste de zero) dos sensores;
- d) Erro de montagem no acoplamento entre turbina e soprador;
- e) Desalinhamento da caixa de mancal;
- f) Deposição de sílica nas palhetas da turbina;
- g) Montagem invertida das sapatas do mancal;
- h) Desgaste entre componentes de escora do mancal;
- i) Porca de escora do mancal se soltando;
- j) Desgaste entre as sapatas e caixa dos mancais;
- l) Desgaste nos calços do mancal de escora;
- m) Falha no material utilizado nas sapatas;
- n) Erosão metálica causada por partículas presentes no óleo de lubrificação

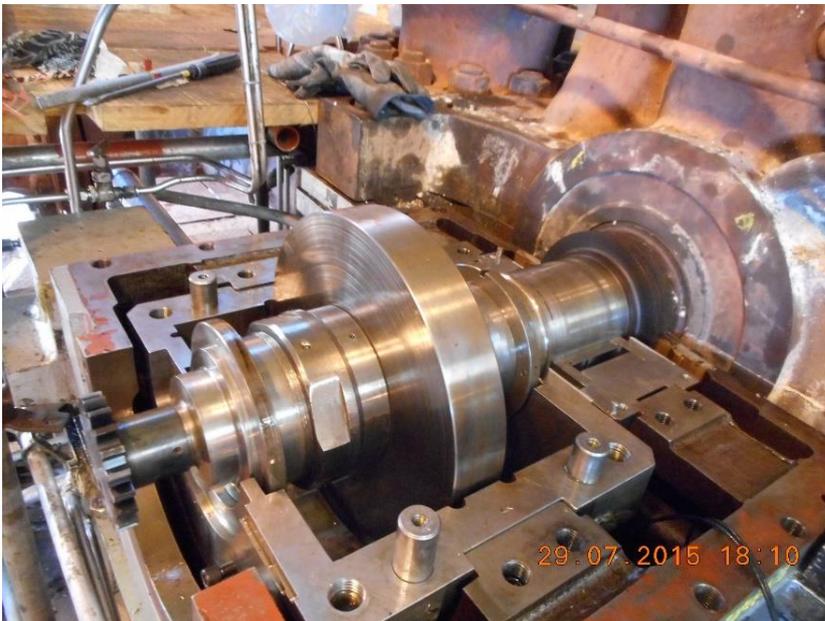
A fim de facilitar o entendimento das hipóteses levantadas, a Figura 24 ilustra uma visão didática dos internos da caixa de mancal, em comparação com a Figura 25 que mostra uma fotografia da caixa aberta, durante a manutenção de 2015.

Figura 24 - Internos da caixa de mancal da turbina



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - Caixa de mancal aberta



Fonte: Autoria própria.

Para cada uma das hipóteses levantadas foram iniciadas ações visando constatar ou refutar a sua validade. A hipótese “a” foi eliminada durante uma breve parada do equipamento em 31/01/2017, chamado de *pit-stop*, que tinha por objetivo permitir uma rápida inspeção visual nos principais pontos da máquina que pudessem

estar relacionados com o alto deslocamento axial do eixo. Neste *pit-stop* foi possível verificar as fixações dos sensores, constatando-se de que estavam bem firmes junto ao equipamento.

Para as hipóteses “b” e “c”, foram verificados os relatórios de testes e calibração dos sensores realizados em 2015 durante a parada do soprador. Todos os sensores foram testados e calibrados com equipamento adequado, fornecido pelo fabricante do sistema. Os relatórios indicavam que todos os pontos foram aprovados com boa sensibilidade e repetibilidade das medidas.

O acoplamento é uma peça responsável por unir o eixo da turbina (equipamento ativo que fornece a energia mecânica) ao eixo do soprador (equipamento passivo que realiza o trabalho). Uma montagem incorreta no sentido de pressão excessiva no acoplamento, resultaria numa força para os dois lados, deslocando tanto o eixo da turbina quanto do soprador. Como os sensores instalados no soprador não detectaram nenhum movimento para aquele lado, a hipótese “d” também foi descartada.

Durante o *pit-stop* de 2017, todas as folgas mecânicas da caixa do mancal foram aferidas e reajustadas. As medidas estavam de acordo com as especificações do equipamento. Após a máquina voltar a operação, os mesmos de deslocamento se mantiveram. Sendo assim, a hipótese “e” também foi descartada.

A deposição de sílica nas palhetas da turbina é um fenômeno relativamente comum. O vapor utilizado como força motriz pode arrastar partículas que, em contato com os internos da turbina, se depositam formando cristais. Por consequência, surgem desbalanceamentos, acompanhados de vibração e desgaste de peças mecânicas, em especial os mancais. Como o mesmo vapor utilizado pela turbina do soprador é utilizado por outros equipamentos na refinaria, uma inspeção foi realizada em outra máquina semelhante a fim de se verificar se havia cristais de sílica. Como não foram encontrados, a hipótese “f” foi parcialmente descartada. No entanto, o estudo desta variável ainda está em andamento.

A hipótese “g” foi descartada após análise dos relatórios de montagem da parada da máquina em 2015. No relatório constam fotografias detalhadas do equipamento onde atesta-se a correta montagem do conjunto de sapatas.

O sistema de lubrificação do conjunto turbina e soprador compreende um par de filtros de óleo responsáveis por retirar partículas suspensas neste, evitando erosão

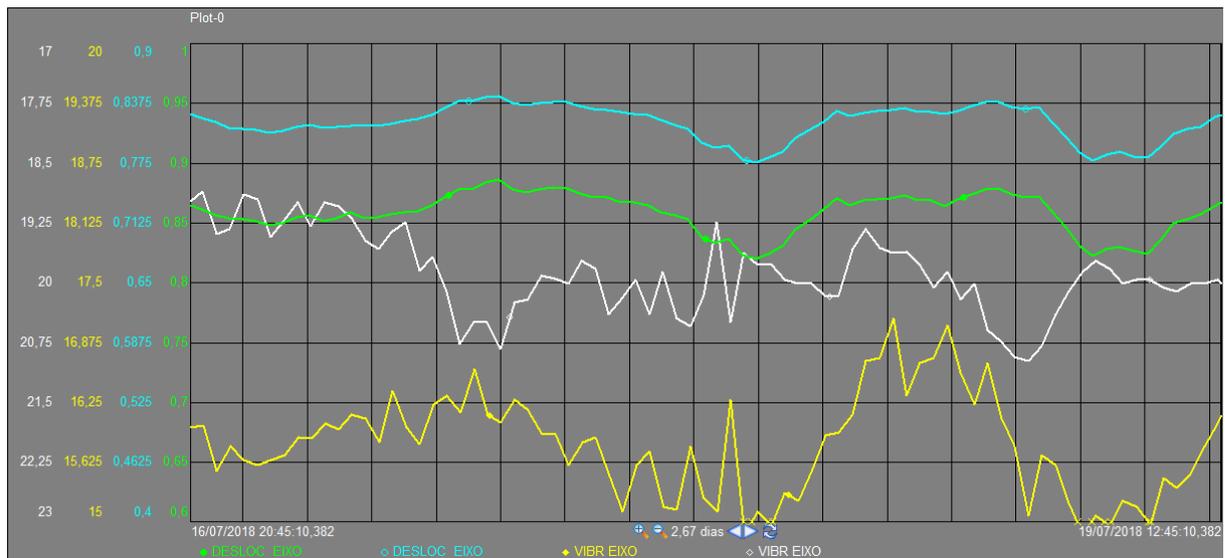
de partes metálicas da máquina. Por este motivo a hipótese “n” também foi descartada.

Restaram como mais prováveis as hipóteses “h”, “i”, “j”, “l” e “m”, que estão relacionadas com o mecanismo de desgaste conhecido como *Fretting* e peças internas as caixas de mancais.

Fretting pode ser definido como o desgaste causado em peças estáticas por vibrações de pequenas amplitudes em uma peça em movimento relativo a esta. O resultado é um desgaste no metal que pode se assemelhar a uma corrosão (KUBIAK; FOUVRY, 2009).

De fato, com base nos dados fornecidos pelo *System 1*, notou-se que quando a vibração radial da máquina aumentava, o deslocamento axial do eixo tornava-se mais acentuado, como demonstra o Gráfico 2, obtido a partir do PI.

Gráfico 2 - Vibrações versus deslocamento axial

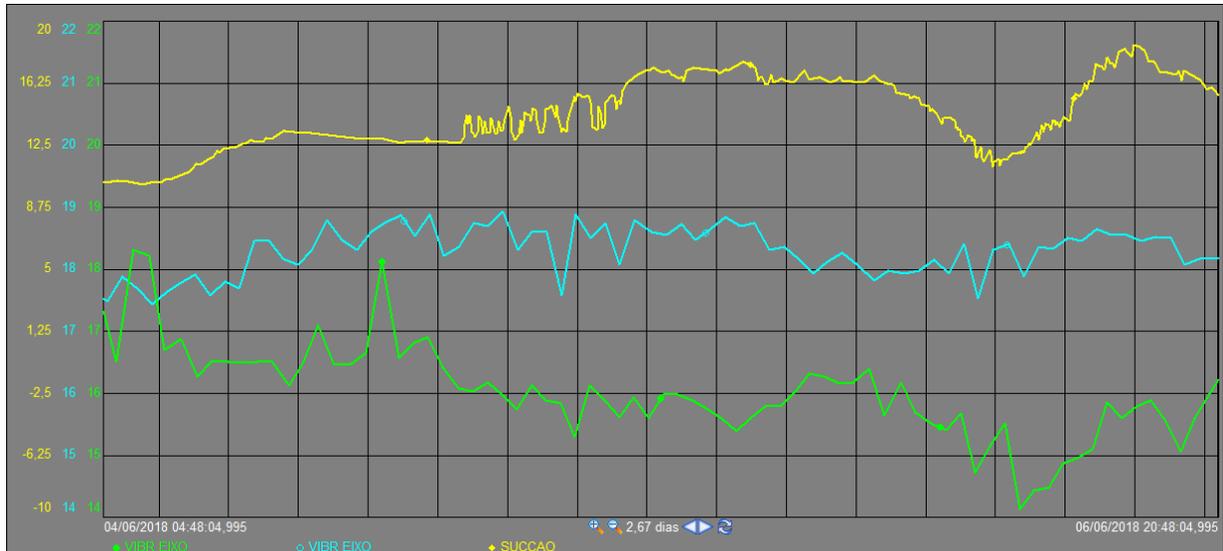


Fonte: Autoria própria.

Ao cruzar fontes de dados de outros sistemas com os dados do *System 1* através do PI *System*, também pôde-se verificar que o aumento de intensidade das vibrações na máquina se correlacionava com a demanda de potência solicitada à turbina e a temperatura ambiente. Como o objetivo principal do soprador é fornecer oxigênio para combustão do catalisador no conjunto conversor, se uma concentração menor de oxigênio estiver disponível no ar atmosférico, uma maior quantidade de ar será necessária para manter a mesma proporção entre oxigênio e combustível. O

Gráfico 3 mostra o gráfico que relaciona a variação das vibrações medidas pelos sensores em relação a temperatura do ar na sucção do soprador.

Gráfico 3 - Vibrações versus temperatura do ar



Fonte: Autoria própria.

De uma forma geral, em uma massa de ar atmosférico mais quente as moléculas de gases estão mais afastadas umas das outras, portanto para suprir uma quantidade definida de moléculas de oxigênio, necessita-se de um maior volume de ar. Ao passo que, com o ar mais frio, o volume demandado é menor.

De posse destas conclusões, alguns testes foram realizados a fim de se determinar a melhor solução de contorno para garantir uma sobrevida para a turbina, até que seja possível realizar uma nova parada programada e aplicar uma solução definitiva. O capítulo seguinte detalha estes testes.

4.2 TESTES REALIZADOS NO EQUIPAMENTO

4.2.1 Aumento de Viscosidade do Óleo Lubrificante

Uma possível solução de contorno imaginada, visando prolongar a vida útil do mancal e não atingir o nível de *trip*, valor a partir do qual o equipamento é comandado automaticamente a desligar, foi diminuir a temperatura do óleo de lubrificação dos

mancais. Uma queda na temperatura do óleo consequentemente aumentaria sua viscosidade, oferecendo uma maior proteção às partes metálicas internas ao equipamento.

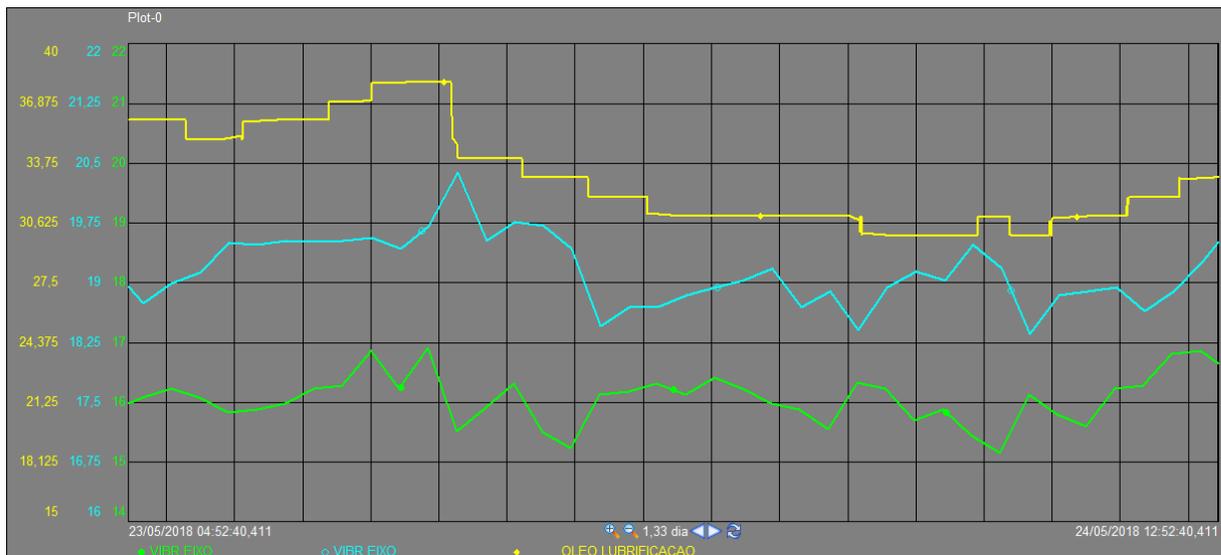
O óleo de lubrificação da máquina circula por um trocador de calor tipo casco/tubo, responsável por refrigerá-lo a uma temperatura de cerca de 34°C. A fim de se diminuir esta temperatura e a caráter de testes, foi instalado um sistema provisório de aspersão de água diretamente sobre a carcaça do trocador de calor, como mostra a Figura 26. Com este sistema, foi possível diminuir a temperatura média do óleo de lubrificação cerca de 1°C.

Figura 26 - Sistema de aspersão de água instalado sobre o trocador de calor



Fonte: Autoria própria.

A temperatura do óleo varia também de acordo com a temperatura ambiente. O Gráfico 4 exibe um transiente de aproximadamente 7°C para baixo nesta temperatura, em relação à vibração do eixo. Nota-se que a segunda variável não acompanhou de forma relevante esta redução.

Gráfico 4 - Vibrações versus temperatura do óleo

Fonte: Autoria própria.

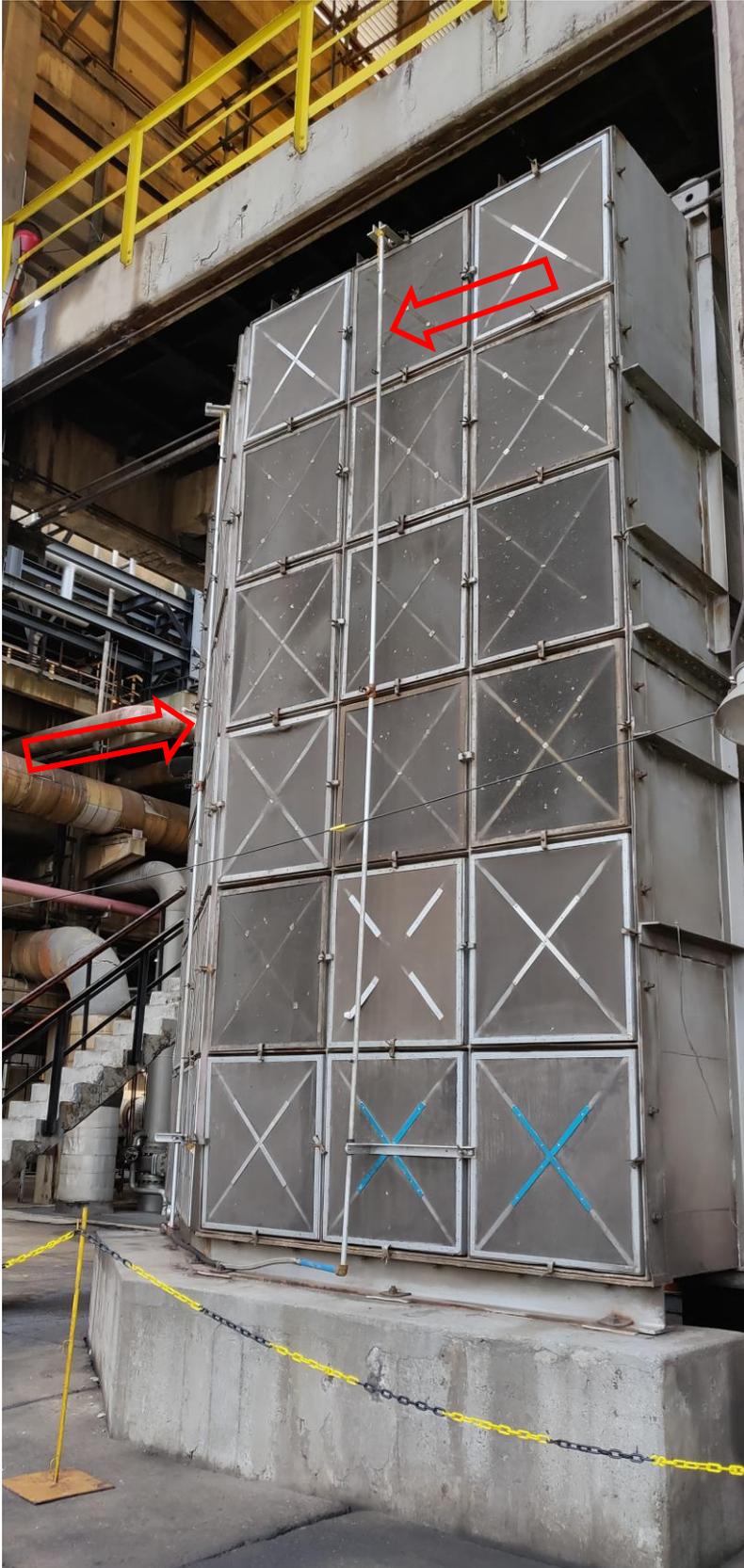
4.2.2 Redução da Temperatura do Ar na Entrada do Soprador

Como já havia se observado a influência da temperatura ambiente na evolução do deslocamento axial da máquina, foi realizado um teste com o objetivo de reduzir a temperatura do ar na entrada deste soprador.

A captação do ar pelo equipamento é feita diretamente a partir da atmosfera, por uma grande abertura protegida por telas para evitar a entrada de qualquer material sólido. O teste foi realizado com a instalação provisória de um sistema de aspensão de água nesta entrada, aumentando assim a umidade relativa do ar captado para 60%, retirando calor do mesmo.

A Figura 27 mostra como ficou esta instalação provisória.

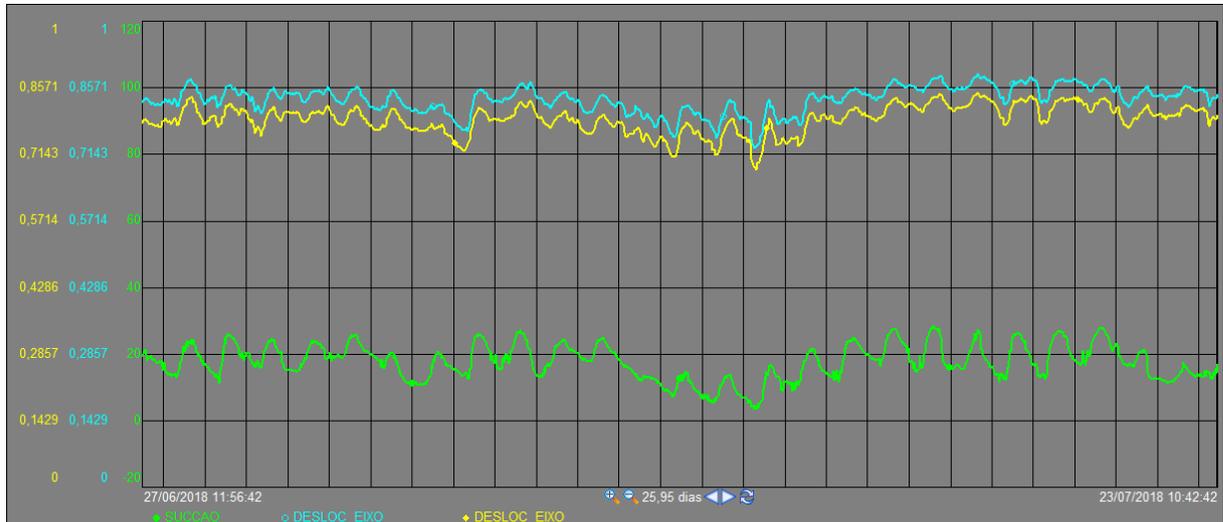
Figura 27 - Sistema de aspersão de água na captação de ar do soprador



Fonte: Autoria própria.

Esta solução mostrou-se viável e com um bom resultado, como demonstra o Gráfico 5.

Gráfico 5 - Redução de temperatura por aspersão de água na admissão de ar



Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Soluções Propostas

Como os testes de aspersão de água na captação da máquina se mostraram mais efetivos, o grupo de trabalho optou por indicar a instalação de um sistema permanente de serpentinas de refrigeração neste sistema, além disso, foram estudados o sistema de mancais da máquina baseado nos dados de projeto do equipamento e nas medições realizadas em paradas de manutenção da turbina. O fato de que os limites de alarme e *trip* por deslocamento do eixo eram mais restritivos do que as medições reais já era conhecido. O limite mecânico de deslocamento levantado pelos técnicos e engenheiros é de 1,425 mm, acima do qual ocorrerá contato entre as partes rotativas e fixas com danos no eixo e na carcaça. Sendo assim, as seguintes soluções de contorno foram propostas:

1. Alteração do *set* de alarme de deslocamento do eixo de 0,73 mm para 0,91 mm;
2. Alteração do *set* de *trip* da máquina por deslocamento no eixo de 0,83 mm para 1,0 mm;
3. Instalação de um sistema de serpentina de refrigeração por nitrogênio na captação de ar da máquina.

As soluções 1 e 2 já foram implementadas, sendo que as alterações foram executadas em duas etapas: Na primeira, os *sets* de alarme e *trip* foram alterados de 0,63 mm e 0,83 mm para 0,84 mm e 0,93 mm respectivamente. Em uma segunda etapa, os valores foram alterados para 0,91 mm e 1,0 mm, como resume o Quadro 1.

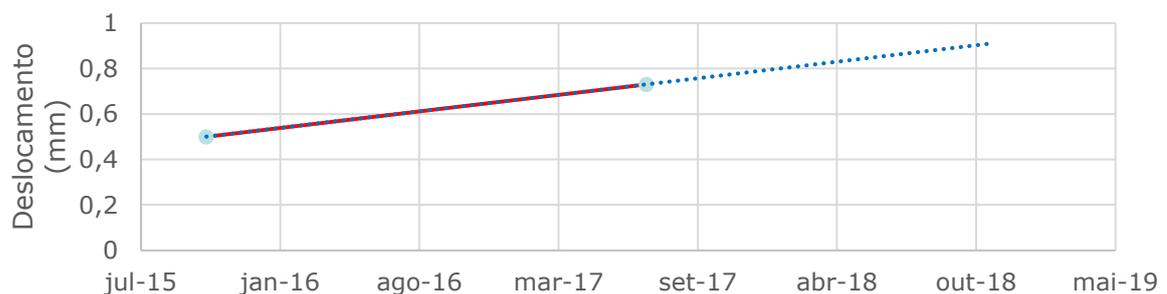
Quadro 1 - Resumo das alterações nos sets de alarme e *trip*

Primeira Alteração de <i>set point</i> de Deslocamento Axial da Turbina - 2017			
Configuração de Projeto		Configuração após primeira alteração em 2017	
Valor de alarme	Valor de <i>trip</i>	Valor de alarme	Valor de <i>trip</i>
±0.63 mm	±0.83 mm	-0,63 mm +0,84 mm	-0,83 mm +0,93 mm
Segunda Alteração de <i>set point</i> de Deslocamento Axial da Turbina - 2018			
Configuração após primeira alteração em 2017		Configuração após segunda alteração em 2018	
Valor de alarme	Valor de <i>trip</i>	Valor de alarme	Valor de <i>trip</i>
-0,63 mm +0,84 mm	-0,83 mm +0,93 mm	-0,63 mm +0,91 mm	-0,83 mm +1,00 mm

Fonte: Autoria própria.

A partir dos dados levantados até o momento, foi possível elaborar uma interpolação no gráfico da tendência, o que gera uma estimativa da progressão do problema. De acordo com a tendência atual de evolução do deslocamento, o valor de 1,0 mm será atingido em fevereiro de 2019, como demonstra o Gráfico 6.

Gráfico 6 - Projeção do deslocamento axial



Fonte: Autoria própria.

A solução 3 ainda está em andamento. O sistema de refrigeração será contratado temporariamente e instalado junto a entrada de ar, permitindo a sobrevida do equipamento. Em conjunto com as alterações nos *sets* de alarme e *trip*, além da refrigeração do óleo, a expectativa da equipe responsável pela análise do problema é de que a máquina mantenha-se operando até julho de 2019, no entanto, a parada de

manutenção planejada para a unidade de craqueamento catalítico está atualmente prevista para 2020. Sendo assim, o acompanhamento está sendo efetuado diariamente, recalculando o horizonte de operação sempre que novos dados surgirem. Ao mesmo tempo, a compra de um novo conjunto de mancais está em andamento e data da parada também está em revisão pela gerência e diretoria da empresa.

5 CONCLUSÃO

A utilização de modelos digitais para simulação e monitoramento de ativos não é algo inteiramente novo. A NASA (Agência Aeroespacial Norte Americana) por exemplo, utiliza complexas simulações digitais em seus foguetes a algumas décadas (PETTEY, 2017). No entanto, a confluência de fatores tecnológicos do momento atual permitiu que este conceito fosse reinventado, favorecendo-se de tecnologias como IoT, *Machine Learning*, *Big Data*, redes sem fio, dentre outras, dando origem ao conceito de Gêmeos Digitais.

Neste trabalho, foram apresentadas definições sobre este conceito, suas possibilidades e expectativas para o futuro que já estão em andamento atualmente. É importante ressaltar que estas definições não encerram o tema pois muito ainda está sendo desenvolvido nesta área.

Como forma de contextualização, foram apresentados algumas plataformas que já existem comercialmente, destacou-se dentre estas a plataforma *System 1* da GE. O *System 1* pode ser melhor definido como um modelo digital de baixa fidelidade de ativos mecânicos, especialmente, máquinas rotativas. Na época do lançamento desta plataforma o termo Gêmeo Digital ainda não havia sido criado, portanto mesmo hoje, ao se pesquisar pelo software junto ao fabricante, vê-se que ele não é definido oficialmente como um Gêmeo Digital.

Parte disto se deve ao fato de que a GE desenvolveu uma plataforma similar ao *System 1* mas no entanto mais avançada, trata-se da plataforma Predix, abordada no capítulo 2.2. Esta plataforma combina além das funcionalidades já existentes no *System 1*, algumas novidades como o tratamento de linguagem natural, através da qual é possível interagir com o modelo digital por comandos de voz, além do aprendizado de máquina, utilizado pela plataforma para a realização de simulações sobre o modelo digital. A plataforma Predix é oficialmente comercializada pela GE sob o conceito de Gêmeos Digitais.

Como forma de estudo de caso, foi apresentado uma situação real onde a utilização do modelo digital de uma máquina no *System 1* permitiu diagnosticar mais precisamente um conjunto de causas básicas de problema de deslocamento de eixo em uma turbina atualmente em operação. A utilização do modelo digital também permitiu o acompanhamento de testes realizados com a máquina, a fim de prolongar

sua vida útil até um momento oportuno para sua parada e troca dos componentes. Este estudo permitiu demonstrar o potencial desta tecnologia dentro do conceito de Indústria 4.0. A possibilidade de agir previamente, com planejamento adequado, evitando paradas indesejadas traduzem-se em economia para a empresa, redução de gastos com compras e contratos de emergência, além de economia com logística comercial necessária para evitar o desabastecimento do mercado.

Ainda há muito a ser explorado neste tema. Aplicações fora do contexto industrial também estão sendo exploradas no meio acadêmico. Áreas como logística e o varejo já se utilizam de softwares de simulação digital de produtos e processos para otimização do negócio, ao se incluir inteligência artificial e realimentação de dados nestes modelos, podem-se criar gêmeos digitais que trarão maior agilidade no processo de tomadas de decisões. Sugere-se como trabalhos futuros a exploração do conceito em outras áreas além de estudos de caso sobre outras plataformas disponíveis no mercado.

REFERÊNCIAS

ABECOM. **O que são mancais e para que servem?** Copyright© ABECOM, publicado em: 17 fev. 2017. Disponível em: <<https://www.abecom.com.br/o-que-sao-mancais/>>. Acesso em: 25 set. 2018.

ABUD FILHO, EMILIO. **Dos túneis de vento à simulação computacional: O caminho do sucesso da Brasilsat.** Copyright© ESSS, publicado em: 20 ago. 2018. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/tunel-de-vento/>>. Acesso em: 20 set. 2018.

CHAPMAN, B. D.; ZWICKY, E. D. **Building internet firewalls.** 1. ed. Sebastopol: O' Reilly & Associates, Inc., 1995.

CIMM. **Definição - O que é manutenção preditiva.** Copyright© Centro de Informações Metal Mecânica (CIMM), 1997-2018. Disponível em: <<https://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/595-manutencao-preditiva>>. Acesso em: 27 set. 2018.

COMPRESSORS. **Sistema de controle Vanguard.** Compressors Controls Corporation, Araucária: [s.n.], 2003.

COTTELEER, M.; SNIDERMAN, B. **Forces of change: Industry 4.0.** Copyright© Deloitte Insights, publicado em: 18 dez. 2017. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/industry-4-0/overview.html>>. Acesso em: 08 out. 2018.

DASSAULT. **3DEXPERIENCE plataforma.** Copyright© Dassault Systemes, 2018. Disponível em: <<https://www.3ds.com/about-3ds/3dexperience-platform/>>. Acesso em: 21 set. 2018.

DEACHER, A.; COTTELEER, M.; HOLDOWSKY, J. **The Internet of Things: A technical primer.** Copyright© Deloitte Insights, publicado em: 08 fev. 2018. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/internet-of-things/technical-primer.html>>. Acesso em: 27 set. 2018.

FAUST, R. A. **Robotics in surgery: History, current and future applications.** New York: Nova Science Publishers, Inc., 2007. 300 p.

GARY, J. H.; HANDWERK, G. E. **Petroleum Refining: Technology and economics**. 4. ed. New York: [s.n.], 2001.

GE. **System 1 - Visão geral do sistema: Apostila de treinamento prático**. Araucária: [S.l.]: [s.n.], 2008a.

GE. **O sistema de monitoramento 3500: Apostila de treinamento prático**. Araucária: [S.l.]: [s.n.], 2008b.

GE. **What is a digital twin?** 2018c. Disponível em: <<https://www.ge.com/digital/predix/digital-twin>>. Acesso em: 20 set. 2018.

GEDIGITAL (2018). **The digital twin: The foundation for digital industrial applications**. Disponível em: <https://www.ge.com/digital/sites/default/files/The-Digital-Twin_Compressing-Time-to-Value-for-Digital-Industrial-Companies.pdf>. Acesso em: 20 set. 2018.

GRIEVES, M. W. **Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication**. Copyright© Dr. Michael W. Grieves, LLC 2014, p. 7. Disponível em: <http://innovate.fit.edu/plm/documents/doc_mgr/912/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.pdf>. Acesso em: 20 set. 2018.

GRIEVES, M. W.; THOMAS, F. **Digital twin manufacturing excellence through virtual factory replication**. DELMIA Apriso, 2015. (1h0m9s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=MU68ZcJ66x4>>. Acesso em: 20 set. 2018.

KAHN, V. **Use of 3DEXPERIENCE to create a digital twin to unify virtual and real worlds - Youtube**. Copyright© Dassault Systemes, 2017. (21m3s) Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=hXvmA7gBbSM>>. Acesso em: 21 set. 2018.

KUBIAK, K.; FOUVRY, S. **Introduction of a fretting-fatigue mapping concept: Development of a dual crack nucleation - crack propagation approach to formalize fretting-fatigue damage**. International Journal of Fatigue, 2009. 250-262. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/056f/5244a5e6a472fbabb03d33a7c5f4ecf1e244.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2018.

MADEIRA, D. **IloT - Industrial Internet of Things**. Embarcados, 2016. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/iiot-industrial-internet-of-things/>>. Acesso em: 08 out. 2018.

MERRIAM. **Merriam webster dictionary**. Merriam-Webster, 2018. Disponível em: <<https://www.merriam-webster.com/>>. Acesso em: 21 out. 2018.

MICHAELIS (2018). **Dicionário brasileiro da língua portuguesa**. Disponível em: <<https://michaelis.uol.com.br/>>. Acesso em: 21 out. 2018.

MUSSOMELI, A. et al. **Expecting digital twins**. Copyright© Deloitte Insights, publicado em: 02 mai. 2018. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/signals-for-strategists/understanding-digital-twin-technology.html>>. Acesso em: 25 set. 2018.

OPSERVICES. **Dicionário da TI**: 120 termos e siglas sobre tecnologia. Copyright© OpServices, 2016. Disponível em: <<https://www.opservices.com.br/dicionario-da-ti/>>. Acesso em: 25 set. 2018.

OSISOFT. **PI System**. OSISoft®, 2018. Disponível em: <<https://www.osisoft.com/pi-system/>>. Acesso em: 20 out. 2018.

OTT, T.; SNIDERMAN, B. **Industry 4.0 and manufacturing ecosystems**. Copyright© Deloitte Insights, publicado em: 21 nov. 2016. Podcast (23m25s). Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/insights/us/en/multimedia/podcasts/manufacturing-ecosystems-exploring-world-connected-enterprises.html>>. Acesso em: 25 set. 2018.

PARRIS, C. J. **Minds + machines: Meet a digital twin**. Copyright© GE Digital, 2016. (14m18s) Disponível em: <<https://youtu.be/2dCz3oL2rTw>>. Acesso em: 20 set. 2018.

PARROT, A.; WARSHAW, L. **Industry 4.0 and the digital twin: Manufacturing meets its match**. Copyright© Deloitte Insights, publicado em: 12 mai. 2017. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>>. Acesso em: 20 set. 2018.

PETTEY, C. **Prepare for the impact of digital twins**. Smarter With Gartner, 2017. Disponível em: <<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/prepare-for-the-impact-of-digital-twins/>>. Acesso em: 24 out. 2018.

QUELHAS, A. D. et al. **Processamento de petróleo e gás**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

REID, J. B.; RHODES, D. H. **Digital system models: An investigation of the non-technical challenges and research needs**. In: 2016 CONFERENCE ON SYSTEMS ENGINEERING RESEARCH. [S.l.]:[s.n.]. 2016. p. 10.

SEGOVIA, V. R.; THEORIN, A. **History of control: history of PLC and DCS**. [S.l.]: [s.n.], 2012. Disponível em: <http://www.control.lth.se/media/Education/DoctorateProgram/2012/HistoryOfControl/Vanessa_Alfred_report.pdf>. Acesso em: 24 out. 2018.

SIEMENS. **Imprensa: Siemens no Brasil**. Copyright© Siemens Brasil, 2018. Disponível em: <<https://www.siemens.com/br/pt/home/a-empresa/release/siemens-amplia-portfolio-de-gemeos-digitais.html>>. Acesso em: 24 out. 2018.

GLOSSÁRIO

A

ALGORITMO: “Conjunto de regras e operações e procedimentos, definidos e ordenados usados na solução de um problema, ou de classe de problemas, em um número finito de etapas” (MICHAELIS, 2018).

B

BACKBONE: “Rede principal por onde circulam todos os dados de todos os clientes da internet” (OPSERVICES, 2016).

BIG DATA: “Conjuntos de dados muito grandes ou complexos, que os aplicativos de processamento de dados tradicionais ainda não conseguem lidar. Os desafios desta área incluem: análise, captura, curadoria de dados, pesquisa, compartilhamento, armazenamento, transferência, visualização e informações sobre privacidade dos dados” (OPSERVICES, 2016).

C

CATALISADOR: “Substância que altera a velocidade de uma reação química” (MICHAELIS, 2018)

COMPRESSOR: “Tipo de máquina usada para comprimir fluido” (MICHAELIS, 2018).

COMPUTAÇÃO EM NUVEM: “O *cloud computing* (computação em nuvem) refere-se à utilização da memória e da capacidade de armazenamento e cálculo de computadores e servidores compartilhados e interligados por meio da internet, seguindo o princípio da computação em grade” (OPSERVICES, 2016).

COQUE: Produto derivado de petróleo, sólido, de aspecto granular, semelhante ao carvão (QUELHAS et al., 2014).

E

ETHERNET: “É um protocolo de conexão para redes locais (LAN) com base no envio de pacotes” (OPSERVICES, 2016).

F

FIREWALL: “Dispositivo de uma rede de computadores que tem por objetivo aplicar uma política de segurança a um determinado ponto desta rede” (OPSERVICES, 2016)

FRETTING: Forma de desgaste provocado por vibrações mecânicas (KUBIAK e FOUVRY, 2009).

G

GASÓLEO: “Produto derivado do petróleo, com ponto de ebulição superior ao do querosene e inferior ao do óleo lubrificante, usado como combustível em motores diesel” (MICHAELIS, 2018).

H

HIDRÁULICO: “Movido pela pressão da água ou óleo”. Adaptado de (MICHAELIS, 2018).

I

Internet of Things: Internet das Coisas: “Objetos físicos podendo utilizar o *backbone* da Internet para comunicar dados sobre sua condição, posição ou outros atributos” (DEACHER; COTTELEER; HOLDOWSKY, 2018).

IP (Internet Protocol): “Endereço único que diferencia cada dispositivo conectado à internet” (OPSERVICES, 2016).

M

MACHINE LEARNING: “Habilita computadores a um auto aprendizado para crescimento e adaptação conforme expostos a novos dados” (OTT; SNIDERMAN, 2016).

MANCAL: “Elementos de máquinas que sevem para apoio fixo para eixos” (ABECOM, 2017).

MANUTENÇÃO PREDITIVA: “Conjunto de programas especiais (Análise e Medição de Vibrações, Termografia, Análise de Óleo, etc.) orientados para o monitoramento de máquinas e equipamentos em serviço. Sua finalidade é predizer falhas e detectar mudanças no estado físico que exijam serviços de manutenção, com a antecedência necessária para evitar quebras ou estragos maiores.” (CIMM, 2018).

N

NAFTA: “Fração líquida do petróleo, usada como matéria-prima na indústria petroquímica” (MICHAELIS, 2018).

R

RACK: “Local físico onde se monta um conjunto de equipamentos relacionados, como servidores, roteadores, *switches*, etc.” (OPSERVICES, 2016).

RÁDIOFREQUÊNCIA: “A área de frequência das ondas de rádio. Abreviação: RF” (MICHAELIS, 2018).

T

TRANSDUTOR: “Circuito com capacidade de converter energia mecânica ou eletromagnética de entrada em sinais elétricos de saída e vice-versa” (MICHAELIS, 2018).

TRIP: Operar ou liberar um mecanismo especialmente projetado para detectar uma condição; detectar um passo em falso, falha ou erro. Traduzido de: (MERRIAM, 2018)

Z

ZONA DESMILITARIZADA (DMZ): “Rede adicionada entre uma rede protegida e uma rede externa, a fim de prover um nível adicional de segurança” (CHAPMAN; ZWICKY, 1995).