

Melhoramento da gestão da manutenção com base na Filosofia *Lean* orientada à Indústria 4.0

David S. F. T. Mendes

david.mendes@estsetubal.ips.pt

Departamento de Engenharia Mecânica, ESTSetúbal, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal

Departamento de Engenharia Eletromecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade da Beira Interior, Portugal

Helena V. G. Navas

hvdn@fct.unl.pt

UNIDEMI, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, NOVA School of Science and Technology (FCT NOVA), Universidade NOVA de Lisboa, Portugal

Fernando M. B. Charrua-Santos

bigares@ubi.pt

Departamento de Engenharia Eletromecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade da Beira Interior, Portugal

Resumo:

As empresas procuram novas ferramentas de gestão e organização, que lhes permitam alcançar uma maior competitividade através da qualidade, fiabilidade e produtividade, assumindo-se a manutenção como um ponto fundamental para enfrentar tais objetivos.

Assim, a Filosofia *Lean* apresenta-se como um importante modelo de gestão para identificar e eliminar os desperdícios, melhorando o processo produtivo e desta forma tornando as empresas mais competitivas. Esta filosofia aliada à gestão da manutenção, pode contribuir para melhorar as atividades da mesma, causando impactos positivos no funcionamento global da empresa.

Por sua vez, a indústria está em constante transformação, e como consequência, os processos de produção são cada vez mais complexos e mais variáveis, fruto da quarta revolução industrial ou Indústria 4.0. Este conceito visa uma aproximação entre os processos de produção físicos e os processos de informação e comunicação, que são fornecidos por tecnologias que atuam através de sistemas integrados, sensores e dispositivos móveis capazes de se comunicarem entre si através da internet.

Sendo a gestão da manutenção primordial e com base na necessidade das empresas em conseguirem alcançar altos níveis de eficiência e eficácia dos

seus sistemas produtivos, este estudo propõe um novo modelo de aplicação que combina os conceitos de Manutenção, Filosofia *Lean* e Indústria 4.0.

Palavras-chave: Filosofia *Lean*, Gestão da manutenção, Indústria 4.0, Manutenção.

Abstract:

Companies are looking for new management and organization tools that allow them to achieve greater competitiveness through quality, reliability, and productivity, assuming maintenance as a fundamental point to face these goals.

Thus, the Lean Philosophy presents itself as an important management model to identify and eliminate waste, improving the production process and thus making companies more competitive. This philosophy, combined with maintenance management, can contribute to improving its activities, causing positive impacts on the company's global operation.

In turn, industry is constantly changing, and consequently, production processes are increasingly complex and more variable, the result of the fourth industrial revolution or Industry 4.0. This concept aims to bring together physical production processes and information and communication processes, which are provided by technologies that work through integrated systems, sensors, and mobile devices capable of communicating with each other over the internet.

As maintenance management is essential and based on the companies' need to achieve high levels of efficiency and effectiveness in their production systems, this study proposes a new application model that combines the concepts of Maintenance, Lean Philosophy, and Industry 4.0.

Keywords: Industry 4.0, Lean Philosophy, Maintenance, Maintenance Management.

1. Introdução

Num mercado cada vez mais competitivo, é necessário que as empresas apostem na melhoria dos seus processos produtivos, com o objetivo de responder de forma mais rápida e eficaz às necessidades do mercado, mantendo a qualidade dos produtos, e baixando o custo dos mesmos. Deste modo, devem procurar novas ferramentas de gestão e organização, e empenhar esforços nas áreas que estão dentro do seu controlo, começando pelo chão de fábrica (Nissoul et al., 2020; Ebrahimi et al., 2019).

Uma das áreas suscetíveis de aumentar a eficiência das empresas industriais é a manutenção. Esta tem ganho cada vez maior importância nas empresas, pois anteriormente a manutenção era uma área com pouca importância, já que as atividades de manutenção só se realizavam quando o equipamento avariava, sendo vista por muitos como um “mal necessário”, que só devia de ser realizada quando era absolutamente necessário (Poór et al., 2019; Coelho et al., 2020).

Deste modo, e para conseguir acompanhar a volatilidade e crescimento do mercado atual, os responsáveis de serviços da manutenção, tem vindo a procurar novas abordagens para atingir elevados níveis de eficácia e eficiência, e aos mesmo tempo conseguir aumentar a satisfação do cliente (Santos & Santos, 2020; Stefani et al., 2021).

De modo a tornarem-se competitivas são muitas as empresas que optam por implementar metodologias de trabalho que as orientem e sirvam como guia para perseguir a melhoria contínua, neste sentido a Filosofia Lean surge como modelo promissor e gerador de resultados efetivos, com o objetivo de eliminar ou reduzir os desperdícios, e conseqüentemente reduzir os custos de produção (Santos & Santos, 2020; Stefani et al., 2021).

A Filosofia Lean tem várias ferramentas associadas, sendo uma destas o Gemba Walk ou realização de visitas regulares ao chão de fábrica, através da observação dos processos, sendo uma das melhores práticas para a identificação de potenciais problemas de segurança, identificar fontes de desperdício, estado do equipamento e estabelecimento de diálogo com os colaboradores, permitindo assim manter com melhor controlo tudo o que ocorre dentro do chão de fábrica. Contudo, esta metodologia apresenta algumas limitações provocadas pela falta ou má comunicação entre os operadores e os responsáveis do Gemba Walk, fazendo com que a recolha de informação nem sempre seja precisa não refletindo de forma fidedigna o está a ocorrer no chão de fábrica (Cruz & Nieves, 2018; Ranjan & Shinde, 2018).

A evolução de novas tecnologias e a sua introdução nos processos de produtivos está a transformar a indústria, levando as empresas a adaptarem os seus processos como forma de se destacarem no mercado, obtendo assim vantagens competitivas duradoras para se diferenciarem perante os seus concorrentes. É a partir destas estratégias que o processo da Indústria 4.0 tem vindo a ganhar maior destaque, sendo também denominada como a quarta revolução industrial. Esta fundiu as novas tecnologias e

inovações de forma muito mais rápida e amplia do que nas revoluções anteriores, caracteriza-se por proporcionar a criação de novos sistemas de fabrico virtuais e físicos, possibilitando fábricas inteligentes (Sakurai & Zuchi, 2018; Tartarotti et al., 2018).

A filosofia Lean e a Indústria 4.0, apresentam semelhanças e compartilham os mesmos objetivos gerais que passa por um aumento de produtividade e flexibilidade que juntamente com a manutenção irá contribuir para que as empresas consigam atingir mais facilmente altos níveis de eficiência e eficácia dos seus sistemas produtivos (Ikeziri et al. 2020; Stefani et al., 2021).

As fábricas inteligentes, como parte da Indústria 4.0, são cada vez mais complexas em termos de equipamentos tecnológicos, manutenção e controlo de processos de fabrico em geral. O ambiente dinâmico leva a uma adaptação dos processos de manutenção e assim como de quase todos os aspetos organizacionais (Ikeziri et al. 2020; Stefani et al., 2021).

Como resultado, e pela lacuna na aquisição de informações que por vezes ocorre quando se realiza o Gemba Walk, foi desenvolvido um sistema que integra os conceitos da Filosofia Lean, Indústria 4.0 e Manutenção que proporcionará uma melhora aquisição de informações tais como tempos de paragens, tempo de ciclo, entre outros indicadores, permitindo uma melhor gestão das intervenções da manutenção, bem como a nível produtivo.

2. Revisão bibliográfica de modelos de aplicação conjunta

Manutenção *Lean* e Indústria 4.0

Através da revisão bibliográfica foi possível identificar uma grande variedade de trabalhos científicos que abordam arquiteturas de melhoria contínua da gestão da manutenção. Deste modo, para a construção do sistema, e após análise de vários artigos científicos publicados foram escolhidos 26 modelos. Após a leitura e análise dos mesmos foram selecionados 5 destes, que combinam os conceitos Manutenção, Filosofia Lean e Indústria 4.0, para uma análise mais detalhada. Estes foram escolhidos tendo em conta vários critérios como: melhoria dos processos produtivos e na tomada de decisão, monitorização dos equipamentos, melhoria contínua dos processos, melhoria da

intervenção da manutenção, manutenção inteligente e flexibilidade de aplicabilidade dos modelos.

Biedermann et al. (2016), desenvolveram um modelo de manutenção inteligente para a otimização de recursos e riscos, que tem como objetivo melhorar a eficiência e eficácia da gestão de ativos. A parte inteligente, representa a perspetiva de eficácia, Lean Smart Maintenance (LSM), esta proporciona uma gestão de manutenção inteligente com o foco na melhoria permanente. A parte Lean, é a perspetiva de eficiência da abordagem LSM. O principal objetivo desta filosofia, é a redução de perdas na entrada dos sistemas de gestão da manutenção, com uma orientação a recursos sustentáveis. O modelo apresentado pelos autores foi implementado na indústria do aço, mais concretamente num laminador de aço (Biedermann et al., 2016).

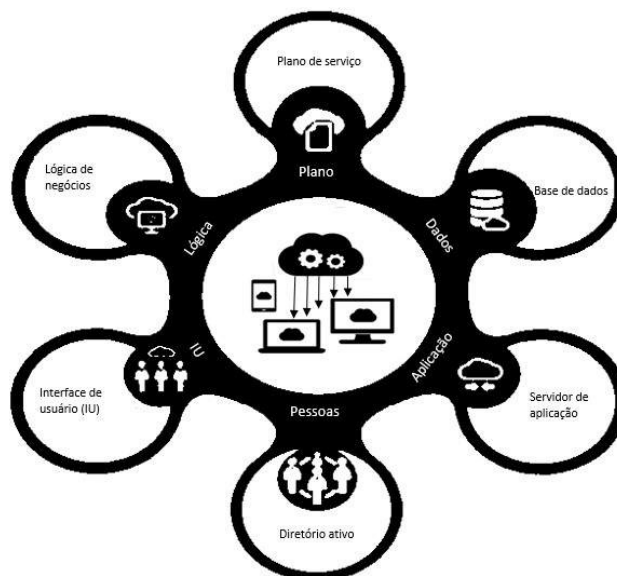
Para a correta implementação do modelo proposto por Biedermann et al. (2016) (Figura 1), inicialmente, deve de ser realizada uma avaliação e classificação dos ativos. Estes são avaliados, por meio de uma ferramenta de avaliação estruturada, podendo ser identificados os ativos críticos de um sistema de produção. Esta é uma fase importante no processo de identificação da estratégia da manutenção, já que ajuda a concentrar recursos limitados em ativos críticos. A avaliação é realizada por uma equipa composta por especialistas de manutenção e operadores que tenham experiência com os ativos do chão de fábrica, com recurso à metodologia Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Todo o processo deve de ser documentado, pois apoiará o conhecimento da gestão na manutenção de acordo com o pretendido com o LSM. Após a avaliação e classificação dos ativos com recurso ao MATLAB procede-se ao agrupamento dos riscos por meio do algoritmo K-means. Com a avaliação, classificação e a análise de riscos feita, é efetuada a escolha dos ativos para reajustar as atividades de manutenção. Após todo este processo, procede-se à monitorização dos ativos que foram escolhidos previamente (Biedermann et al., 2016).

O modelo proposto por Biedermann et al. (2016) e após a sua implementação no caso de estudo permitiu identificar várias oportunidades de melhoria. A avaliação de risco, forneceu uma base importante para as decisões de gestão de ativos estratégicos. Adaptação da estratégia de manutenção, por meio da Filosofia Lean, reduziu vários riscos sem fazer investimentos de elevada dimensão. A indústria 4.0 ajuda a desenvolver um modelo de prognóstico de avarias (Biedermann et al., 2016).

Figura 1 – Modelo do processo LSM.

Fonte: Adaptado de Biedermann et al. (2016)

Shahin et al. (2020) desenvolveram um sistema de suporte de decisão Kanban Estimated Actual Total (EAT) baseado em nuvem como mostra a figura 2 para demonstrar a integração de uma tecnologia da Indústria 4.0 (computação em nuvem) e uma ferramenta Lean (Shahin et al., 2020).

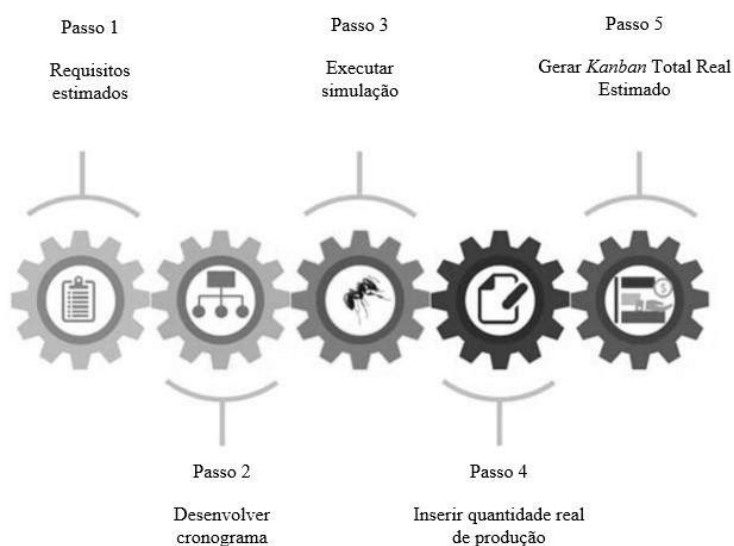
Figura 2 – Elementos fundamentais da nuvem *Kaban*.

Fonte: Adaptado de Shahin et al. (2020)

O Kanban tem algumas limitações no que concerne a uma visão corporativa de gestão de recursos. Deste modo os autores desenvolveram uma plataforma que fornece uma visão holística da gestão de operações, usando a tecnologia em nuvem que proporciona a Indústria 4.0. Este sistema de suporte na tomada de decisão, combinado com uma metodologia robusta de melhoria contínua, pode contribuir para uma melhor tomada de decisão. O modelo proposto é desenvolvido e implementado numa empresa genérica de gestão de operações de serviços, utilizando uma plataforma em nuvem (Shahin et al., 2020).

A estrutura proposta como mostra a figura 2 consiste em seis elementos fundamentais que podem ser ligados e desligados, ampliados a partir de qualquer navegador moderno. Os seis elementos incluem uma chave de licença do sistema, que determina o tamanho e escala do mesmo (Plano de Serviço). O banco de dados, que contém informações relevantes da produção. Um servidor baseado em nuvem, que possui todas as páginas da web e itens (Servidor de aplicação). Um sistema de autenticação de usuário, para que estes possam aceder por meio das credenciais de e-mail da empresa. A interface do usuário contém o menu principal e submenus que podem ser acedidos por vários utilizadores, onde também podem ser contemplados as regras necessárias para a entrada de dados e tarefas de relatórios (Shahin et al., 2020).

A figura 3 mostra as etapas a seguir para a implementação do sistema. A primeira etapa é construir o valor total estimado do trabalho e as atividades individuais a realizar. A segunda, é estabelecer um cronograma. Normalmente, trata-se de uma análise de capacidade e requisitos com base nos recursos existentes. A terceira etapa, é uma simulação do sistema de suporte à decisão. A quarta etapa, consiste em reunir as quantidades reais de produção. As horas de trabalho utilizadas, o número de produtos de má qualidade e as horas de produção perdidas devido ao tempo de inatividade. A última etapa, é exibir o progresso do trabalho e da atividade com base no sistema Kanban EAT que pode ser visto por meio de vários dispositivos que tenham acesso à internet (Shahin et al., 2020).

Figura 3 – Estrutura de implementação da nuvem *Kanban*.

Fonte: Adaptado de Shahin et al. (2020)

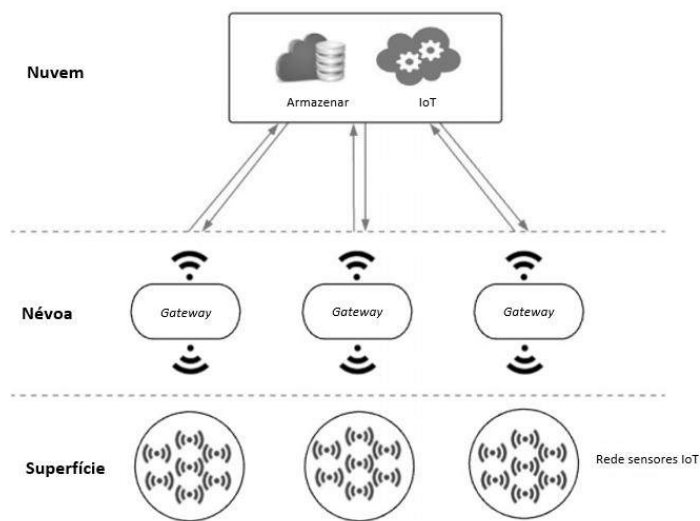
Magadán et al. (2019) desenvolveram um sistema low-cost de monitorização de motores elétricos em tempo real. O sistema será a base para a deteção de anomalias operacionais e um futuro sistema de manutenção preditiva. De modo que o sistema não tenha um custo elevado, este foi desenvolvido com componentes de hardware e software de baixo custo, como módulos multisensores e gateway, software de código aberto e uma versão gratuita de um serviço de análise da Internet of Things (IoT) (Magadán et al., 2019).

O funcionamento do sistema de modo geral, é feito por meio de sensores acoplados nos motores a monitorizar. O gateway por sua vez envia os dados recolhidos pelos sensores para a Cloud (nuvem), onde será possível o armazenamento, tratamento e visualização dos dados por meio do ThingSpeak, com recurso a um computador (Magadán et al., 2019).

Como se pode observar na figura 4, o sistema é composto por três camadas. A primeira camada é composta por sensores IoT, que permitem a recolha de toda a informação desejada. Nesta camada é também realizada a filtragem, agregação e transformação de dados. Esta camada é constituída por um modulo multisensor de baixo custo, SensorTag CC2650, da Texas Instruments, que tem um processador ARM Cortex-M3, 128 KB de memoria flash programável e cinco sensores integrados, incluindo sensores de movimento (MPU9250) e humidade (HDC1000). Também tem um

acelerómetro, um magnetómetro e um giroscópio, medindo vibrações com frequência de 1 KHz. O módulo suporta comunicação sem fio por meio de Bluetooth. A segunda camada é formada por gateways, que têm como função recolher os dados dos vários sensores e fazer a ligação com a última camada. Os elementos que constituem a segunda camada são os gateways, computador de bordo Raspberry Pi 3 Model B+, que tem 1 GB de RAM, uma porta HDMI e 4 USB 2.0, bem como entradas para conectar uma câmara e um touchscreen. A última camada, é onde todos os dados relevantes são armazenados, analisados e visualizados por meio de um sistema de armazenamento e um serviço de análise da IoT. As duas primeiras camadas ajudam a distribuir o processamento da informação entre os sensores e a Cloud, melhorando a velocidade e reduzindo a quantidade de dados a transferir (Magadán et al., 2019).

Figura 4 – Arquitetura do sistema *low-cost* de monitorização de motores elétricos em tempo real.



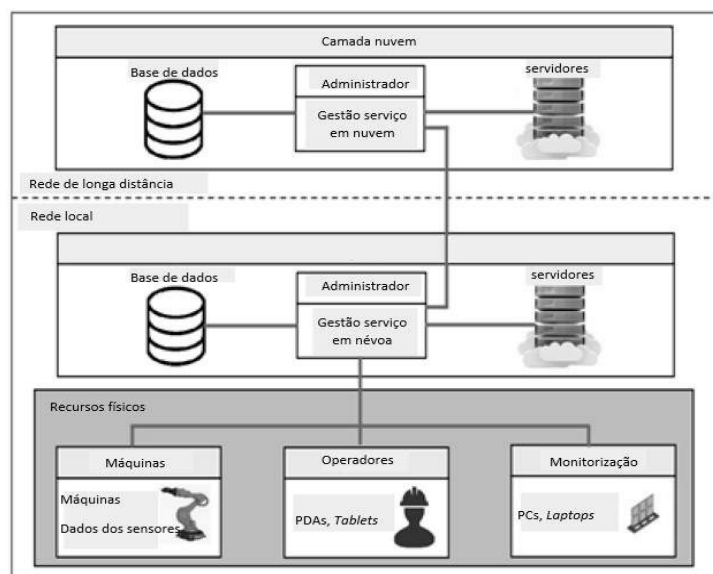
Fonte: Adaptado de Magadán et al. (2019)

Apesar do sistema permitir recolher informações sobre as vibrações do motor elétrico, estas não são suficientes. Assim é necessário utilizar o Fast Fourier Transformation (FFT) sobre as acelerações medidas no motor. O FFT foi calculado no módulo multisensor e no gateway. Com o módulo é utilizado o software CMSIS DSP, projetado para uso em dispositivos baseados no processadores Cortex-M. Os módulos multisensores e gateways comunicam-se entre si por meio de Bluetooth, que é usado

para transmitir pequenos pacotes de dados recolhidos pelos sensores. De modo a conectar com a última camada os gateways transferem os dados por meio de HTTP para a API REST ThingSpeak (Magadán et al., 2019).

Ashjaei & Bengtsson (2017), desenvolveram sistema para melhorar a gestão da manutenção inteligente. Como mostra a figura 5, o sistema é composto por duas camadas. A primeira camada é composta pelos recursos físicos: fábrica, máquinas e equipamentos, tablets, sala de monitoramento e por dispositivos de armazenamento de dados e processamento, que tem como função de fazer a conexão e filtragem dos dados recolhidos da fábrica, máquinas e equipamentos para segunda camada. A última camada, Camada em nuvem, é composta por uma unidade de processamento e armazenamento de dados. A comunicação entre as duas camadas é possível pela rede local, no entanto, o sistema pode suportar dados vindos do exterior pela rede de longa distância também existente no sistema. O funcionamento do sistema consiste na recolha de dados por meio de sensores que estão acoplados aos recursos físicos. Após a recolha dos dados e o seu devido tratamento, estes são enviados para a sala de monitoramento bem como para os dispositivos móveis, que permitem fazer o acompanhamento em tempo real do estado dos recursos físicos. A rede local, como a rede de longa de distância permitem o controlo e monitoramento a todo o instante, e caso o sistema detete uma anomalia, este emite um aviso (Ashjaei & Bengtsson, 2017).

Figura 5 – Plataforma proposta para a gestão da manutenção inteligente.

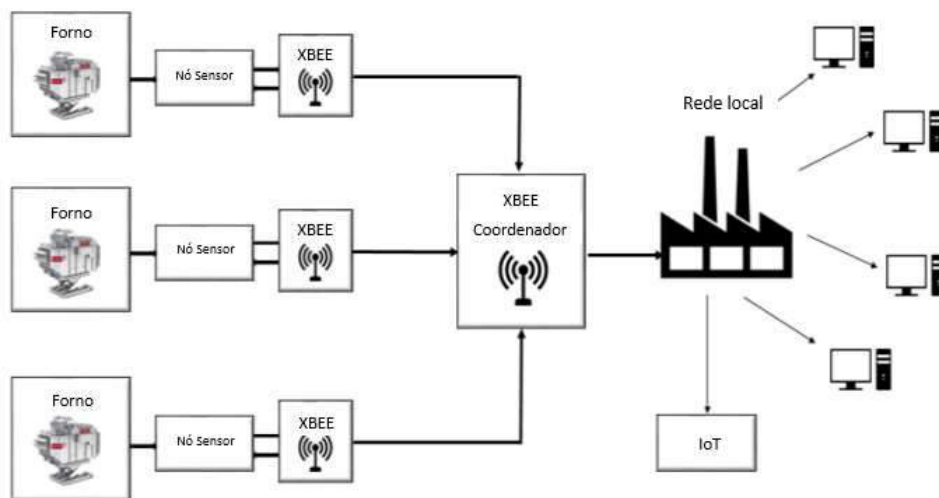


Fonte: Adaptado de Ashjaei & Bengtsson, (2017)

Islas et al. (2019), desenvolveram um protótipo que permite a monitorização contínua da condição dos fornos de fundição de Alumínio. A fundição é um processo que permite que o alumínio derretido seja transformado em produtos. Deste modo, o Alumínio deve de estar a temperatura constante, tornando o forno num elemento importante neste processo e o controlo da temperatura torna-se fundamental. O protótipo permite monitorizar os fornos para que estes operem a temperaturas que oscilam entre os 600°C e 620°C (Islas et al., 2019).

O sistema de monitoramento proposto, usa a tecnologia XBee para construir uma rede de sensores sem fio. O controlador da rede irá enviar as informações recolhidas dos fornos para uma rede local por meio da internet como mostra a figura 6 (Islas et al., 2019).

Figura 6 – Arquitetura do sistema de monitorização.



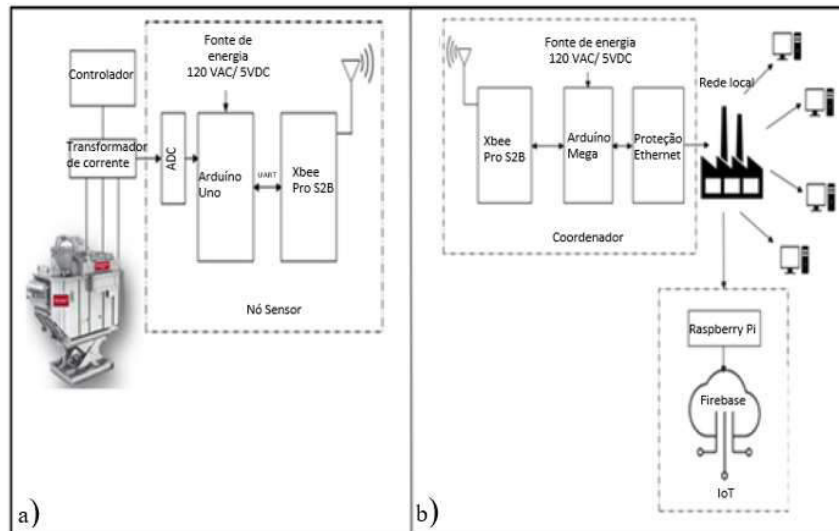
Fonte: Adaptado de Islas et al. (2019)

A rede de sensores sem fios é responsável pela medição da corrente elétrica do forno e pelo envio para o coordenador e a constituição de cada sensor pode ser observado na figura 7 a). O coordenador é o gestor da rede e receberá os dados enviados pelos sensores e identifica a origem de cada dado, que por sua vez exibirá na rede da empresa por meio de um servidor Web inserido no Arduino Mega como mostra a figura 7 b). Graças à Internet das coisas o departamento de manutenção pode ser alertado por e-mail da existência de qualquer anomalia existente em cada um dos fornos. Também é

possível armazenar os dados obtidos na nuvem, para tal utiliza-se um Raspberry Pi (Islas et al., 2019).

Figura 7 – Arquitetura segundo Islas et al.

a) Arquitetura do nó sensor; b) Arquitetura do coordenador.



Fonte: Adaptado de Islas et al. (2019)

Para a implementação do protótipo proposto por Islas, et al. (2019) é necessário o software X-CTU, e os componentes de hardware: módulos Xbee Pro S2B, projetados com o protocolo Zigbee, XBee shield, Ethernet shield, Arduino Uno, Arduino Mega, Raspberry Pi, uma fonte de alimentação e um transformador, a rede local, IoT e uma Dashboard (Islas et al., 2019).

2.1. Identificação de vantagens e limitações dos modelos selecionados

Embora os cinco modelos selecionados abordem alguns dos conceitos de interesse para o presente estudo e tenham algumas semelhanças como a monitorização em tempo real da condição dos recursos físicos, estes apresentam algumas vantagens e limitações.

Apesar do modelo LSM abordar os três conceitos, Manutenção, Filosofia Lean e Indústria 4.0 como é pretendido, este não é de todo específico em todas as fases da implementação do mesmo. Na fase da monitorização dos ativos não está descrita como foi implementada nem qua componentes de hardware, software foram utilizados,

surgindo dúvidas do modo como foi realizada a monitorização dos ativos escolhidos. Outra limitação, é o facto de o modelo proposto ter sido só implementado num tipo de indústria que é caracterizada por ter ativos de elevados custos e o sistema produtivo em cadeia, também este com altos custos de falha, não sabendo se este sistema é replicável numa empresa de pequena ou média dimensão. Para além das limitações descritas a avaliação de risco é um processo demorado e mesmo com a criação de uma ferramenta de avaliação de critérios não foi possível avaliar todos os objetivos importantes.

O sistema desenvolvido por Shahin et al. (2020) aborda dois dos três dos conceitos: Filosofia Lean e Indústria 4.0 não abordando o conceito de Manutenção. Este, permite a visualização em tempo real do processo de produção, quantidade produzida real, horas de trabalho utilizadas, número de itens com má qualidade, assim como o número de paragens da linha. O sistema proposto contribui para melhorar o sistema produtivo e obter indicadores importantes do mesmo, permitindo ter uma melhor tomada de decisão. Embora o sistema esteja descrito, este não está detalhadamente, faltando uma descrição mais pormenorizada quer dos constituintes necessários para compor o sistema (hardware e software), bem como as fases de implementação.

O sistema proposto por Magadán et al. (2019) envolve os conceitos Manutenção e Indústria 4.0, é um sistema de fácil implementação e económico no ambiente industrial. Apesar de ser um sistema atrativo em termos económicos, este ainda precisa de ser mais desenvolvido para que seja mais completo, pois necessita da criação de um sistema de deteção automática de anomalias, a rotulação de todos os dados recebidos e armazenados na nuvem, bem como o desenvolvimento de um modelo preditivo para estimar a probabilidade de falha do motor, ajudando para a redução dos custos de manutenção.

Ashjaei & Bengtsson (2017), propõem um sistema que interage com os conceitos Manutenção e Indústria 4.0. O sistema pretende adequar-se a alguns problemas como a velocidade e segurança dos dados. Este sistema permite a monitorização da vibração podendo ainda ser introduzida no sistema algumas ações como por exemplo aumento e diminuição da velocidade de rotação de forma remota, contribuindo assim para a redução da vibração. Para além da rede local, este possibilita a interação com elementos externos pela rede de longa distância trazendo mais vantagens na comunicação entre vários dispositivos internos e externos.

O Protótipo que Islas et al. (2019) desenvolveram apesar de este ter sido projetado para monitorizar a temperatura dos fornos revelou-se importante para melhorar o desempenho da manutenção. Este sistema pode ser melhorado pela versatilidade e ser aplicado em diferentes domínios e em diferentes parâmetros a monitorizar, contudo não aborda o conceito da Filosofia Lean.

Assim, os cinco sistemas abordam alguns dos três conceitos alvo do estudo, sendo o modelo proposto por Biedermann et al. (2016) o que aborda todos os conceitos, contudo este é mais complexo que os restantes. O sistema proposto que Shahin et al. (2020) desenvolveram envolve os conceitos da Filosofia Lean e Indústria 4.0 e não contempla o conceito da manutenção. Os sistemas propostos por Magadán et al. (2019), Ashjaei & Bengtsson (2017) e Islas et al. (2019) tem por base a Indústria 4.0 e a Manutenção não interagindo a Filosofia Lean, que possibilitaria obter um melhor desempenho e melhoria contínua quer do sistema produtivo como no departamento da Manutenção.

Os cinco sistemas propostos apresentarem algumas limitações semelhantes como distância máxima entre os vários dispositivos que compõem o sistema, pois quanto maior a distância entre estes, menor será a quantidade de dados recolhidos. Outra limitação, tem haver com a quantidade de dados a recolher e analisar, sendo o que está por de trás deste problema para além da quantidade de dados a recolher é a complexidade dos mesmos. Embora um dos sistemas propostos tenha em consideração em melhorar a segurança do sistema, os sistemas analisados têm ainda algumas lacunas neste sentido.

3. Proposta de uma metodologia de Manutenção *Lean* em ambiente da Indústria 4.0

Embora tenha sido possível verificar pela análise das arquiteturas já existentes para a melhoria contínua da gestão da manutenção que alguns dos sistemas propostos combinassem os conceitos: Manutenção, Filosofia Lean e Indústria 4.0, estes são na sua maioria de maior complexidade no que diz respeito à sua implementação. Nas restantes arquiteturas analisadas que abordam os três conceitos alvos de análise, foi possível destacar vários pela simplicidade do sistema e flexibilidade de aplicação, contudo

nenhum que tivesse a interação dos três conceitos. O sistema apresentado baseou-se sobretudo na arquitetura recentemente proposta por Magadán et al. (2020).

O sistema proposto, é uma adaptação e melhoria dos sistemas apresentados anteriormente, de forma a adequar-se e enquadrar-se da melhor forma aos objetivos delineados. Para a conceção deste, definiu-se que teria por base a Indústria 4.0, pela capacidade que este conceito fornece na monitorização em tempo real das máquinas e equipamentos, o que possibilita a recolha com precisão de parâmetros de elevada importância que com a sua análise contribuirá para uma melhor toma de decisão, quer no sistema produtivo bem como no planeamento ou intervenção da manutenção, o que fará melhorar consideravelmente o desempenho produtivo da empresa, trazendo consigo uma melhor gestão e utilização dos recursos utilizados.

A Indústria 4.0 traz consigo significativas vantagens para as empresas e o setor da manutenção não é exceção, já que estas novas contribuições, facilitam os controlos e acessos remotos, assim como a automação dos processos e dispositivos. O incremento das tecnologias que a Indústria 4.0 facilita como referido, proporciona uma melhor recolha e análise de dados importantes como tempos de paragens, tempo de ciclo, tempo de reparação, entre outros, trazendo consigo vários benefícios como a redução dos tempos de paragens não programadas, melhoramento no fluxo de produção de forma contínua, redução de riscos, aumento da segurança e preservação do meio ambiente.

De modo a beneficiar das vantagens que a Indústria 4.0 proporciona e melhorar os vários sistemas analisados anteriormente e em particular o sistema desenvolvido por Magadán et al. (2020), introduziu-se a Filosofia Lean, pois esta metodologia de gestão possibilitará juntamente com a Indústria 4.0 obter uma melhoria contínua quer no sistema produtivo como no departamento da manutenção. A introdução da Filosofia Lean na manutenção vem contribuir para melhorar este departamento que é parte integrante e fundamental no processo produtivo de qualquer indústria, que fará melhorar consideravelmente o desempenho das atividades da manutenção, bem como na qualidade das intervenções da mesma.

O sistema foi desenvolvido para que a sua implementação ocorra apenas numa parte da empresa, e neste caso será aplicado ao chão de fábrica, assim como no departamento da manutenção. Este, para além de ser de fácil aplicação, é composto por elementos de

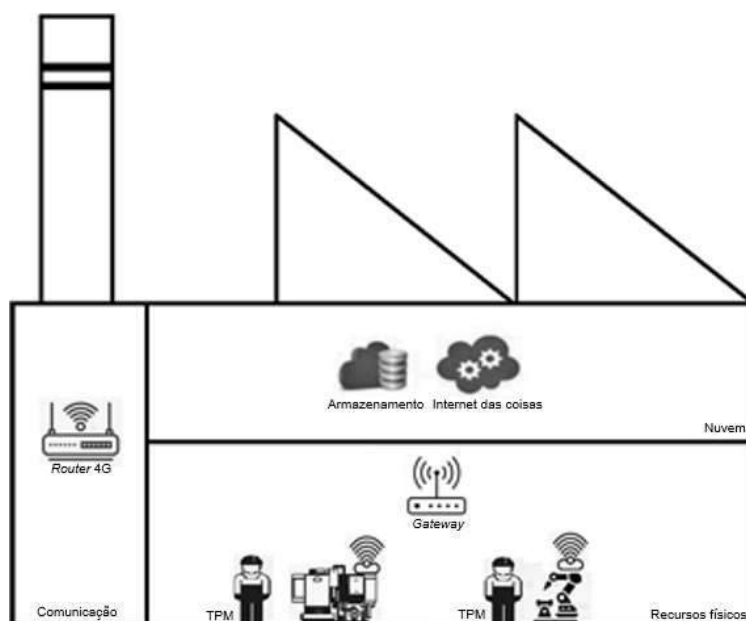
baixo custo, tornando-o num sistema de monitorização de máquinas e equipamentos versátil, económico que pode ser utilizado em qualquer contexto empresarial.

Na figura 8 é possível observar o sistema proposto. Este, é composto por três camadas que permitiram após a sua implementação assegurar a monitorização de forma contínua e precisa dos indicadores mais relevantes da manutenção e dos processos produtivos como a disponibilidade intrínseca e operacional, Tempo médio de reparação, Tempo médio entre falhas, Tempo de ciclo e Eficiência global do equipamento. A primeira camada é composta pelos recursos físicos: máquinas e equipamentos, sensores, tablets e pelos operadores e técnicos de manutenção que recebem alertas e dados em tempo real. A segunda camada, comunicação, permite fazer a conexão entre as várias camadas e os dispositivos de visualização móveis ou fixos. A terceira camada, nuvem, é composta por um serviço de plataforma da internet das coisas e o sistema de armazenamento e processamento de dados. A par da arquitetura a implementar, o sistema carece da implementação da Manutenção Produtiva Total ou Total Productive Maintenance (TPM).

Também é de salientar que a metodologia proposta, teve como base a gestão da manutenção, os seus indicadores, e que este possa também fornecer dados relevantes para melhorar a gestão dos processos produtivos.

Assim, a metodologia apresenta flexibilidade de aplicação e pode ser facilmente adaptada de forma a poder monitorizar de forma contínua e em tempo real vários outros parâmetros como a vibração e ruído, temperatura, entre outros.

Figura 8 – Proposta do modelo de aplicação que combina os conceitos de Manutenção, Filosofia *Lean* e Indústria 4.0



Fonte: Autor

3.1. Descrição do funcionamento da metodologia proposta

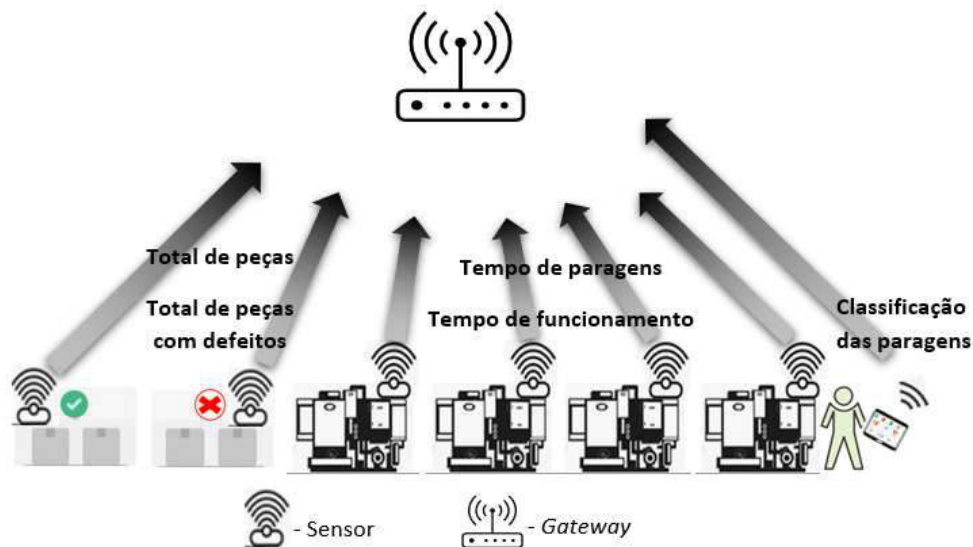
O sistema é apoiado pela rede de internet local (sem fios) e vários dispositivos que permitem a recolha dos dados, armazenamento e visualização dos mesmos por meio de dispositivos móveis ou fixos.

De modo a possibilitar a comunicação entre os diferentes componentes que compõem o sistema, é possível encontrar várias soluções como o Wi-fi, Global System for Mobile (GSM) ou Bluetooth Low Energy (BLE). Para realizar a comunicação entre os componentes do sistema foi escolhido a tecnologia BLE, que é uma tecnologia de comunicação sem fios. O BLE permite reduzir os consumos de energia em dispositivos que não precisam de transmitir grandes volumes de dados, consumindo muito menos energia, quando comparado com o Bluetooth clássico sendo uma opção em aplicações que tenham capacidade de energia limitada.

A monitorização das máquinas e equipamentos, total de peças produzidas com ou sem defeitos é realizada por meio de sensores sem fios que recolhem e transmitem os dados para o gateway (Figura 9). Caso ocorra uma paragem, o operador com recurso a um tablet, smartphone ou um dispositivo ligado à internet classifica o tipo de paragem. A classificação da paragem é efetuada acedendo à plataforma de internet do

ThingSpeak, onde possibilita não só a inserção da classificação das paragens, mas também a visualização de todos os indicadores associados à máquina ou de outros dados relevantes na gestão da manutenção como do processo produtivo.

Figura 9 – Monitorização de tempo de paragens, tempo de funcionamento, total de peças com e sem defeitos produzidas



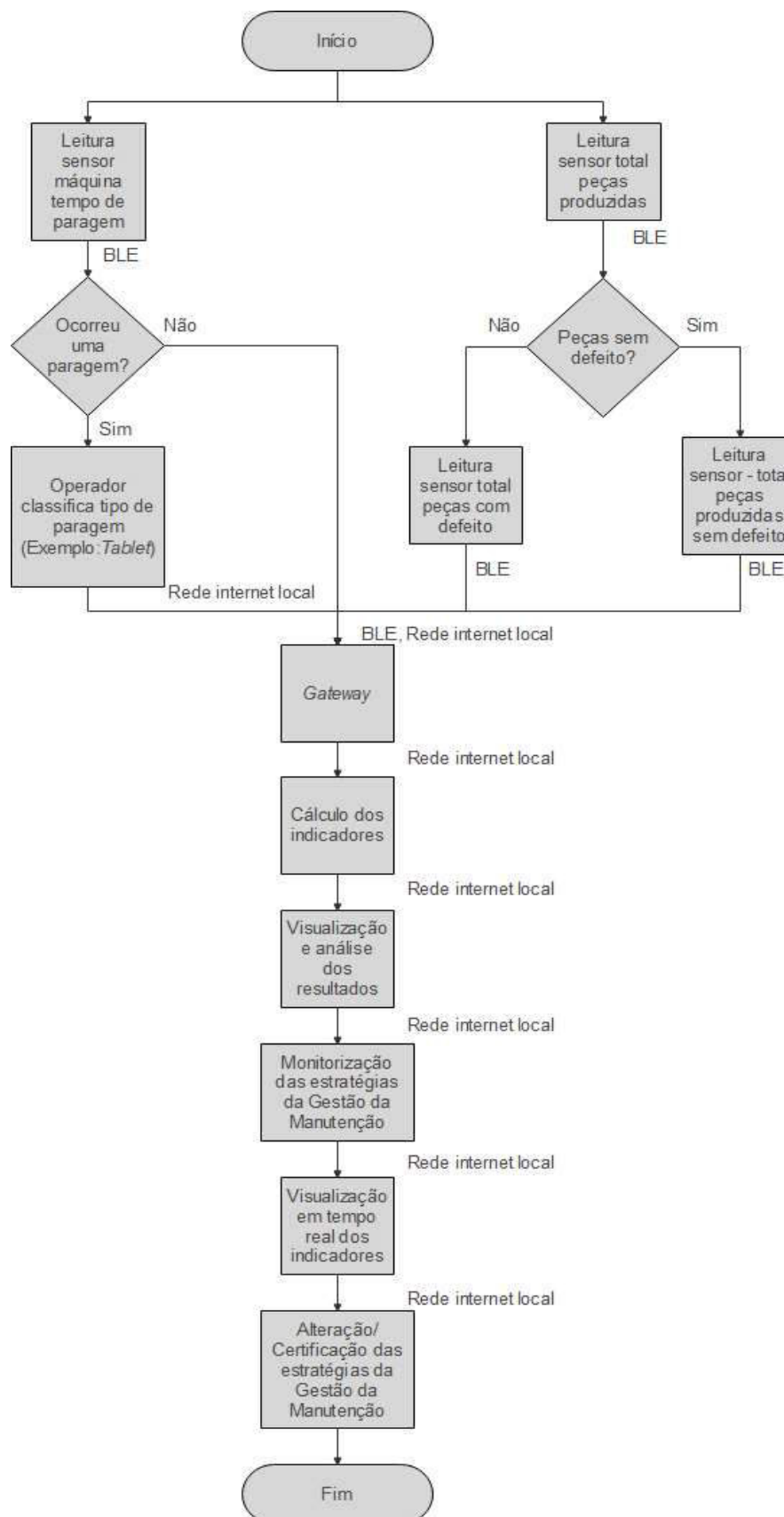
O gateway por sua vez, tem como objetivo receber os dados de todos os sensores existentes no chão de fábrica como mostra a figura 10. Este processa os dados enviados pelos sensores e após o processamento dos mesmos, envia para o servidor situado na nuvem.

Figura 10 – Interface do Gateway com a camada Nuvem



Na última camada, o processador armazena toda a informação e faz de interface para a visualização dos dados em tempo real com recurso a uma versão gratuita do ThingSpeak, um serviço de plataforma da internet das coisas que permite agregação, análise de fluxo de dados e visualização em tempo real, por meio dos vários dispositivos existentes no chão de fábrica como computadores, tablets, dashboards, touchscreens, smartphones, entre outros dispositivos. A figura 11 descreve o funcionamento acima descrito de forma esquemática e resumida.

Figura 11 – Fluxograma da descrição do funcionamento do sistema



Fonte: Autor

4. Discussão dos resultados

O modelo desenvolvido quando comparado com os sistemas de monitorização apresentados anteriormente, possui algumas semelhanças no que concerne à sua função básica: monitorização em tempo real de parâmetros, ser de fácil aplicação e de baixo custo, contudo este foi concebido para que possa dar uma melhor resposta nas mais variadas áreas, tipos e dimensões industriais. Este difere dos modelos apresentados e analisados pela novidade da combinação dos conceitos: Manutenção, Filosofia Lean e Indústria 4.0 e no foco principal, pois este tem como função, a aquisição de dados relativos à gestão da manutenção e produtivo e não na monitorização de parâmetros de condição como temperatura, vibração e ruído, entre outros. Não obstante, o modelo apresentado pode ser facilmente adaptado, e ter dois objetivos: monitorização dos indicadores de gestão da manutenção e a monitorização do estado do funcionamento de máquinas de forma remota, conferindo enorme versatilidade e aplicação em mais variadíssimas indústrias e aplicações.

Os componentes que constituem o modelo integram-se nas máquinas, de forma não intrusiva, possibilitando assim a utilização deste sistema em máquinas antigas e recentes e potenciar a comunicação entre estas. A comunicação entre os vários dispositivos é realizada sem fios, fazendo o sistema modular e de custo reduzido.

A utilização deste modelo em empresas vem trazer várias vantagens quer ao nível da gestão da manutenção como ao nível produtivo, melhorando significativamente o desempenho destas, possibilitando e potenciando uma maior troca de informações entre estas duas áreas em tempo real de forma rápida, fácil e precisa, contribuindo para uma melhor tomada de decisão.

O modelo para que seja de baixo custo acaba por ser influenciado no que concerne à distância entre os vários dispositivos que o compõem, ou seja, quanto maior for a distância entre os vários dispositivos, menor será a qualidade de comunicação entre estes, pois nem todos os elementos possuem o mesmo alcance de comunicação, causando algumas limitações, influenciando a aquisição dos dados. Esta situação pode ser contornada com a alteração do protocolo de comunicação e dos dispositivos

escolhidos, contudo o custo de implementação da arquitetura irá estar diretamente dependente do custo dos dispositivos escolhidos.

Como referido o modelo carece da implementação da Manutenção Produtiva Total. Esta metodologia juntamente com a implementação do sistema de monitorização em tempo real, irá trazer vários outros benefícios à empresa, quer ao nível da manutenção, produtivo bem como noutras áreas também estas importantes para o bom funcionamento da empresa, como a área administrativa, gestão de topo pelo envolvimento e implicação que os vários elementos têm no dia a dia. Esta metodologia contribuirá, para melhorar vários indicadores, o desempenho global da empresa, também permitirá alcançar e manter o estado das máquinas num estado de conservação ideal de modo a evitar avarias inesperadas, perdas de velocidade e qualidade do sistema produtivo, bem como na redução de defeitos no sistema produtivo, com a introdução da Manutenção Autónoma.

5. Conclusão

Para que as empresas consigam sobreviver, as partes constituintes da mesma devem estar necessariamente em sintonia com os objetivos gerais e das políticas de manutenção não podendo nenhuma delas constituir exceção. Assim, a manutenção é um fator determinante e imprescindível para qualquer empresa.

Desta forma, os responsáveis de serviços da manutenção, têm procurado novas abordagens que possam contribuir não só para melhorar o sistema produtivo, mas também corresponder da melhor forma às necessidades do mercado.

Assim, uma gestão da manutenção eficiente e eficaz, contribui para melhorar significativamente o desempenho da gestão da manutenção, assim como do sistema produtivo, a gestão dos ativos, e conseqüentemente na resposta da procura do mercado e na satisfação dos clientes.

Uma das formas que permite evidenciar o que está a ocorrer no sistema produtivo, é realizar visitas regulares ao chão de fábrica ou Gemba Walk, e retirar todos os dados importantes, como tempo de ciclo, tempo paragens programadas e não programadas, fazer uma identificação de fontes de desperdícios, entre outras dados relevantes. Apesar desta metodologia contribuir significativamente para o melhoramento do

desempenho do sistema produtivo e manutenção, por vezes, esta não é devidamente aplicada quer seja pela falta ou má comunicação entre os responsáveis do Gemba Walk e os operadores ou na recolha dos tempos.

Face a esta lacuna, desenvolveu-se um modelo de aplicação conjunta que combina a Manutenção, Filosofia Lean e Indústria 4.0 que permite a monitorização em tempo real de indicadores importantes como, disponibilidade intrínseca e operacional, Tempo médio de reparação, Tempo médio entre falhas, Tempo de ciclo, Eficiência global do equipamento, que permitem evidenciar de uma forma mais clara e precisa o que está a ocorrer no chão de fabrica, bem como apoiar os responsáveis de serviços de manutenção na tomada de decisão, como na gestão do sistema produtivo.

O modelo desenvolvido é constituído por sensores que recolhem informações, tempos de paragens e quantidade peças produzidas com e sem defeito, que por sua vez enviam para o gateway. Este, tem a função de receber os dados enviados pelos vários sensores acoplados nas máquinas, e enviá-los para a nuvem, onde toda a informação relevante é armazenada e processada com recurso a uma aplicação gratuita da internet das coisas, ThingSpeak. Esta permite para além do tratamento de dados, a visualização em tempo real dos mesmos bem como a classificação das paragens por parte dos operadores.

O modelo poderá se tornar numa ferramenta útil quer para a área produtiva como para a área da manutenção. Apesar do mesmo tenha sido projetado para a monitorização dos indicadores mais relevantes da gestão da manutenção e dos sistemas produtivos, devido à versatilidade do mesmo, este pode ser utilizado em diferentes domínios quer ao nível do sistema produtivo, indústria ou na monitorização de diferentes parâmetros pela facilidade de adaptação do mesmo.

Apesar deste modelo ser de fácil aplicação, flexível e low-cost, este apresenta algumas limitações no que diz respeito à distância entre dispositivos que compõem o sistema. Esta limitação tem haver com a distância entre os vários dispositivos pois nem todos os elementos conseguem ter um alcance razoável de comunicação, fazendo com que a aquisição dos dados possa ser influenciada por este motivo. Outra das limitações tem haver com o facto do modelo para além da implementação da arquitetura que compõem o sistema de monitorização, ter a necessidade da implementação da Manutenção Produtiva Total, que pode evidenciar alguns desafios dentro da empresa

pois esta metodologia de gestão requer muita dedicação quer por parte da gestão de topo como pelos técnicos de manutenção em facultar formação e treino aos seus operadores de modo que estes ao longo do tempo venham a ter um melhor desempenho, autonomia para realizar pequenas tarefas de manutenção de forma autónoma.

Agradecimentos

A autora da FCT NOVA agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT-MCTES) pelo apoio dado ao trabalho de investigação através do Projeto UIDB/00667/2020 (UNIDEMI).

Referências

- Ashjaei, M., Bengtsson, M., 2017. Enhancing Smart Maintenance Management Using Fog Computing Thecnology. 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2017, 1561-1565.
- Coelho, T. M. S., Souza, M. C. A., Costa, A. P. T., Alencar, D. B. & Parente, R. S. (2020). Otimização de processo de manutenção com a modificação do duto de exaustão de uma UTE da cidade de Manaus. *South American Development Society Journal*, 06(18), 1-19.
- Cruz, J. A. C. & Nieves, R. (2018). Implementación de Metodología “Lean” en Celda de Manufactura.
- Ebrahimi, M., Baboll, A. & Rother, E. (2019). The evolution of world class manufacturing toward Industry 4.0: A case study in the automotive industry. *IFAC-PapersOnline*, 52(10), 188-194.
- Ikeziri, L. M., Melo, J. C., Campos, R. T., Okimura, L. I. & Junior, J. A. G. (2020). A perspetiva da indústria 4.0 sobre a Filosofia de gestão Lean Manufacturing. *Brailian Journal of Development*, 6(1), 1274-1289.
- Islas, L., Gutierrez, S., Rodríguez, F., 2019. Wireless Sensor Network Prototype to Monitor the Condition of Holding Furnaces in the Aluminum Casting Plant. 2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV), 2019, 1-8.
- Magadán, L., Suárez, F., Granda, J., García, D., 2020. Low-cost real-time monitoring of electric motors for the Industry 4.0. *International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing (ISM2019)*, 42, 939-398.
- Nissoul, H., Harrouti, T., Serrou, D. & Abouabdellah, A. (2020). Impact of maintenance 4.0 on the performance of the production function: Application to the automotive industry in Morocco. *5th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*, 2020, pp. 1-5.
- Poór, P., Ženíšek, D & Basl, J. (2019). Historical Overview of Maintenance Management Strategies: Development from Breakdown Maintenance to Predictive Maintenance in

Accordance with Four Industrial Revolutions. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 495-504.

Ranjan, S. K. & Shinde, D. K. (2018). Implementing Lean Manufacturing Technique in Fabrication Process Planning – A Case Study. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 05(07), 2600-2606.

Sakurai, R. & Zuchi, J. (2018). As Revoluções industriais até à Indústria 4.0. Revista Interface Tecnológica, 15(2), 480-491.

Santos, B. S. & Santos, P. V. S. (2020). Aplicação de ferramentas *Lean* em uma indústria de transformação de plásticos. Revista Mundi – Engenharia, Tecnologia e Gestão, 5(8), 304-01-304-23.

Stefani, E., Oliveira, J. M. B., Montini, P., Wanderley, J. F. & Costa, I. (2021). Aplicabilidade da Filosofia Lean na Indústria 4.0. Brazilian Journal of Development, 7(3), 21335-21348.

Tartarotti, L., Sirtori, G. & Larentis, F. (2018). Indústria 4.0: Mudanças e Perspetivas. XVIII Mostra de Iniciação Científica, Pós-graduação, Pesquisa e Extensão, 1-7.

Authors Profiles

David S. F. T. Mendes currently is an invited assistant at the Department of Mechanics of the ESTSetúbal, Polytechnic Institute of Setúbal - Portugal. He holds a master's in production engineering from ESTSetúbal, Polytechnic Institute of Setúbal - Portugal. He has a degree in Mechanical Engineering-Production from ESTSetúbal, Polytechnic Institute of Setúbal. He is currently a PhD student in Industrial Engineering and Management at the University of Beira Interior (UBI) - Portugal.

Helena Navas has received a PhD from the NOVA School of Science and Technology – Universidade NOVA de Lisboa – Portugal. She is currently Assistant Professor at the Department of Mechanical and Industrial Engineering of the NOVA School of Science and Technology - Portugal and researcher at UNIDEMI. Her research interests are in the areas of innovation, continuous improvement, quality, and process management.

Fernando Charrua-Santos is currently Assistant Professor at the Department of Electromechanical Engineering of the Faculty of Engineering at the University of Beira Interior - Portugal and researcher at C-MAST - Center for Mechanical and Aerospace Science and Technologies.