



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Vicente Ribeiro Paiva

**UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA MOTION FLEET
MANAGEMENT E WNOLOGY PARA GESTÃO
ENERGÉTICA**

Eficiência energética na da WEGeuro

Dissertação no âmbito do curso de Mestrado de Engenharia Mecânica em Energia e Ambiente orientada pelo Professor Doutor Ricardo Mendes e Jorge Fernando de Sousa apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologias, Departamento de Engenharia Mecânica

Julho de 2023

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA MOTION FLEET MANAGEMENT E WNOLOGY PARA GESTÃO ENERGÉTICA

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Energia e Ambiente/ Produção e Projeto

Autor

Vicente Ribeiro Paiva

Orientadores

Ricardo Mendes

Jorge Fernando de Sousa

Júri

Presidente Professor Doutor José Carlos Miranda Góis - Professor Auxiliar do
DEM FCTUC

Orientador Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes

Vogais Professor Doutor Márcio Duarte Albino dos Santos - Professor
Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Universidade de
Coimbra



WEGEURO Lda.

Coimbra, Julho, 2023

Agradecimentos

Quero agradecer desde mais a oportunidade que me foi oferecida na WEGeuro por parte do Pedro Maia e ao Daniel Santos por me facilitar a comunicação inicial com a empresa.

Aos meus pais que me sustentaram todo o percurso até aqui e me deram força por tempos difíceis.

Ao professor Ricardo Mendes pela orientação dada.

A aqueles que me acompanharam diariamente, testemunhos do meu percurso e amigos para a vida, os rapazes da *Traphouse*.

Resumo

A quarta revolução industrial veio trazer novas ferramentas que permitiram as empresas perceber não apenas mais pormenorizada como também de forma contínua as actividades e processos pelos quais elas mesmas são constituídas. Através de sensores inteligentes e *Internet of Things* (IoT) uma onda de novos dados e métricas nasceram e permitem hoje aos gestores, engenheiros e técnicos retirarem um leque de informações das suas máquinasⁱ. Monitorização via sensores generalizadaⁱⁱ, e programas de computador, comunicação *wireless* e em tempo real e, já nos presentes dias, computação em *cloud*ⁱⁱⁱ e processamento de dados por inteligência artificial são as maravilhas que tornam o ambiente industrial cada vez mais vivo e dinâmico.

Atualmente existe uma tendência impulsionada pelo aquecimento global de nos tornarmos responsáveis por aquilo que consumimos e produzimos, criando as tendências "green", amigas do ambiente. Já encontramos esta mentalidade bem inserida no mercado^{iv} e o investimento por parte das empresas em comparecer com estas expectativas não tem ficado atrás, proporcionando um crescimento contínuo ao aparecimento de tecnologias que tornam os vários processos da vida humana cada vez mais sintonizados com a natureza e conscientes do seu impacto.

Uma das preocupações na base destes impulsos é a crise energética que hoje é agravada pela subida de preços e inflação, criando urgência na procura dos grandes consumidores de mitigarem a sua pegada e adquirir vantagem no mercado. Assim, eficiência energética tomou, na literatura, um lugar predominante^v. A norma ISO 50001, 2018^{vi}, veio responder a esta necessidade estabelecendo guias para a monitorização e gestão eficiente da energia. De uma forma abrangente para albergar as diferentes configurações de indústrias, a norma visa a identificação dos consumos de forma estratificada e atualizada de forma a possibilitar a comparação fácil e desenvolvimento de medidas de mitigação dos mesmos.

Ao longo das últimas décadas tem sido constante o crescimento do consumo e produção de dados, neste aspeto a necessidade de acompanhar em tempo real cada gasto energético é mais uma fonte de dados. Para obter, encaminhar e armazenar este fluxo a WEG desenvolveu um sistema de *IoT* que funciona nos três níveis. Sensores inteligentes

(*WEGscan* e *MotorScan*) fazem leituras de várias características do ativo que enviam via um *gateway* para a plataforma de *Wnology, Motion Fleet Management* que armazena, ilustra e interpreta com recurso a inteligência artificial os dados recebidos.

O trabalho mostrado nestas páginas utilizou a tecnologia desenvolvida na WEG para recolher dados e verificar a existência de correlações capazes de beneficiar e promover em tempo real a redução do consumo de energia e a eficiência da frota de motores da WEG através dos *inputs* de sensores instalados, promover a eficiência energética dentro da fábrica e facilitar a implementação de um sistema de monitorização dos consumos que permita a obtenção da norma 50001 e que seja uma base para novos e mais dinâmicos sistemas de consumo energético que permitam um consumo mais eficiente a menor custo e cada vez mais baseado nas energias renováveis que hoje temos disponíveis.

Palavras-chave: IoT, Inteligência Artificial, Gestão energética, ISO 50001, Wnology, WEGeuro.

Abstract

The fourth industrial revolution brought new tools that allowed companies to understand not only in more detail but also in a continuous way the activities and processes by which they themselves are constituted. Through intelligent sensors and Internet of Things (IoT) a wave of new data and metrics were born and today allow managers, engineers and technicians to extract a range of information from their assets. Monitoring via generalized sensors and computer programs, wireless and real-time communication and, already nowadays, cloud computing and data processing by artificial intelligence are the wonders that make the industrial environment increasingly alive and dynamic.

Currently, there is a tendency driven by global warming to become responsible for what we consume and produce, creating "green" trends, which are environmentally friendly. This mentality is well established in the market and the investment by companies in meeting these expectations has not been left behind, providing continuous growth to the emergence of technologies that make the various processes of human life increasingly in tune with nature and conscious of its impact.

One of the concerns behind these impulses is the energy crisis, which today is aggravated by rising prices and inflation, creating urgency in the search for large consumers to mitigate their footprint and gain an advantage in the market. Thus, energy efficiency has taken a predominant place in the literature. The ISO 50001, 2018 standard responded to this need by establishing guidelines for efficient energy monitoring and management. In a comprehensive way to accommodate the different configurations of industries that differ markedly, the standard aims to identify consumption in a stratified and updated way in order to enable easy comparison and development of mitigation measures.

Over the last few decades, consumption and data production have grown steadily, in this regard the need to monitor each energy expenditure in real time is yet another source of large amounts of data. To obtain, forward and store this flow, WEG developed an IoT system that works on three levels. Intelligent sensors (WEGscan and MotorScan) read various asset characteristics that are sent via a gateway to the Wnology, Motion Fleet

Management platform, which stores, illustrates and interprets the received data using artificial intelligence.

The work shown on these pages used the technology developed at WEG to gather data and verify the existence of correlations capable of benefiting and promoting in real time the reduction of consumption and the efficiency of the fleet of WEG motors through the inputs of implemented sensors, promoting energy efficiency within the factory and facilitate the implementation of a consumption monitoring system that allows the achievement of the 50001 standard and that is a basis for new and more dynamic energy consumption systems that allow more efficient consumption at a lower cost and increasingly based on the renewable energies that we have available today.

Keywords: lot, Artificial Inteligence, Energy Management, ISO 50001, Wnology, WEGEURO.

Índice

Índice de Figuras	ix
Simbologia	1
Simbologia	1
Siglas	1
1. UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA MOTION FLEET MANAGEMENT E WNOLOGY PARA GESTÃO DA ENERGIA	2
1.1. Introdução	2
1.2. WEG	3
2. Procedimento	3
2.1. Revisão Bibliográfica	3
2.1.1 Wnology, Motion Fleet Management e WEGscan	5
2.2. Contextualização	9
2.3. ISO 50001 – Eficiência energética	10
2.3.1. IPC’s e linha-base:	10
2.4. Contexto energético da fábrica de Santo Tirso	14
2.4.1. Auditoria energética EDP	15
2.4.2 Processo Produtivo	16
2.4.3. Intervenientes - Máquinas	18
3. Desenvolvimento	23
3.1. Replicação	23
4. Resultados e discussão	31
4.1 Análise de substituição de motores	32
4.1.1. 2,2 kW	33
4.1.2. 4kW	35
4.1.3. 11kW	35
4.1.4. 22kW	36
4.2. Erro	37
4.3. Regressão Multi-linear	38
4.4. Planeamento de expansão	40
4.4.1. Intervenientes energéticos relevantes	40
5. Conclusões	41
6. Trabalhos futuros	41
Referências Bibliográficas	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ambiente de trabalho da plataforma Wnology: workflow MFM.....	6
Figura 2– Ambiente de trabalho Wnology: Dashboards	7
Figura 3 - Exemplo de pares atributo-valor JSON.	13
Figura 4 – Exemplo workflow usado.	14
Figura 5 - Consumo percentual energético.....	15
Figura 6 - processo produtivo do rotor	16
Figura 7 - processo produtivo da bobinagem do estator.....	17
Figura 8 - motores 2kW e 4kW	19
Figura 9 - motor 11kW	19
Figura 10 – Gráfico de consumos na semana 16 a 24 de Janeiro de 2023 da bomba 2 da máquina MASTED.....	21
Figura 11 – gráfico de Carga/Potência de saída/Velocidade de rotação/Temperatura de operação na semana de 16 a 24 de Janeiro do motor da bomba 2 da máquina MASTED.....	21
Figura 12 – payload da máquina MASTED	25
Figura 13 – Directoria “series” da payload.	26
Figura 14 – Directoria do Ponto 0 da payload.....	27
Figura 15 – Directoria do ponto 4 (hora certa) dentro da payload.	28
Figura 16 – Texto CSV por decodificar	30
Figura 17 – curva de eficiência/carga do motor de 4kW / 2 pólos	32
Figura 18 – Gráfico Carga/Temp/Pot-tempo da semana 16 a 24 de Janeiro para motor de bomba 2 da máquina MASTED	34
Figura 19 – Gráfico Carga/Temp/Pot-tempo da semana 16 a 24 de Janeiro para motor de unid. Corte MASTED.....	34
Figura 20 – Gráfico Carga/Temp/Pot-tempo da semana 16 a 24 de Janeiro para motor de unid. Óleo MASTED.....	35
Figura 21 – Gráfico Carga/Temp/Pot-tempo da semana 16 a 24 de Janeiro para motor de da Unid. Hidráulica MASTED.....	35
Figura 22 – Gráfico Carga/Temp/Pot-tempo da semana 16 a 24 de Janeiro para motor de prensa de introdução de estatores.....	36
Figura 23 - Algoritmo de Regressão Multi-Linear parte 1	39
Figura 24 - Algoritmo de Regressão Multi-Linear parte 2.....	39
Figura 25 – Algoritmo de Regressão Multi-Linear parte 3	39

SIMBOLOGIA

Simbologia

η_p = eficiência à potência p

v_l = coeficiente auxiliar

v_o = coeficiente auxiliar

Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

eSEC – *equivalent Specific Energy Consumption*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

HTTP - *Hypertext Transfer Protocol*

IOT – Internet of Things

IPC - Índice de *Performance* Chave

LB – Linha-Base

MFM – Motion Fleet Management

MTO – *Made-to-Order*

MQTT - *Message Queuing Telemetry Transport*

PDCA – *Plan Do Check Act*

SEC – *Specific Energy Consumption*

SFM – *Shop Floor Management*

SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition

WS – WegScan

1. UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA MOTION FLEET MANAGEMENT E WNOLOGY PARA GESTÃO DA ENERGIA

1.1. Introdução

A comunidade científica tem debatido o tópico da produção energética, alterações climáticas e consumos de combustíveis fósseis durante a boa parte das últimas três décadas. Não vem a acaso que dentro deste tema tenha vindo a ganhar relevância tomar consciência e contabilizar a forma como a energia é utilizada. Classificação energética em equipamentos elétricos já se encontra universalmente em cada compra, edifícios já ganham direito a uma mesma classificação homóloga com base na sua performance e capacidade de manter ao mínimo os consumos, aproveitar ao máximo a energia solar e manter o conforto dos seus habitantes, vemos, portanto, que a necessidade já se tornou ação até ao nível mais quotidiano.

Em contexto industrial, tecnologias de monitorização já foram introduzidas com o advento da indústria 4.0 em que processos produtivos são dotados de sensores inteligentes criando uma rede de dados, a *Internet of things(IoT)*, com este novo conceito vem seguida a questão do que efetivamente pode ser medido e como podemos tornar dados em ferramentas.

.O trabalho descrito em baixo focar-se-á na funcionalidade da plataforma MFM da WEG e a sua contribuição para a catalogação dos processos de produção em termos energéticos, e tem por objetivo desenhar e por em prática um sistema de gestão energética feito em conformidade com guias da norma ISO 50001 (2018). Para tal será replicado o modelo de *digital twin* desenvolvido por Adão (2022), calculados indicadores de produção e consumo energético que serão medidos e atualizados a intervalos de tempo definidos, posteriormente manipulados utilizando a plataforma *Wnology*. Com os dados retirados analisar-se-á a potencial troca de motores para uma classificação IE superior e calculada, com recurso a processos automáticos, uma linha-base energética para permitir a monitorização, análise e apresentação de medidas de poupança energética.

O presente trabalho tenta aproveitar as potencialidades destas tecnologias para controlar de forma pormenorizada os consumos energéticos e a eficiência a que os mesmos são feitos de forma a homogeneizar, reduzir e melhorar a qualidade de energia, mitigando picos excessivos, otimizando e integrando tecnologias renováveis no suprimento energéticos e tornar a indústria mais verde. Para fazer isto foi consultada a norma ISO 50001 cuja certificação será um objetivo da empresa.

1.2. WEG

A WEG S.A. foi fundada em Jaraguá do Sul em 1961 por Werner Ricardo Voigt, Eggon João da Silva e Geraldo Werninghaus como Eletromotores Jaraguá. A designação WEG foi tomada mais tarde e na sua origem estão as iniciais dos seus fundadores. A sua missão era a construção de motores elétricos de indução que ainda hoje é o núcleo do seu negócio que atualmente já desde 1980 que expandiu para áreas como redutores, automação, tintas e vernizes, e soluções digitais. A sua internacionalização começou em 1970 com vendas por toda a América latina e hoje em dia conta com estatuto de multinacional, encontrando-se em trinta e seis países com fábricas em doze deles e conta com mais de quarenta mil colaboradores sendo dos líderes de mercado em motores elétricos de baixa, média e alta tensão. Está valorizada na bolsa de valores de São Paulo desde 1971.

O trabalho descrito em baixo foi realizado sobre a alçada da WEGEURO - Indústria Eléctrica, S.A., o braço europeu da WEG. Com duas fábricas operacionais, a WEGEURO produz motores de média e baixa tensão na Maia e Santo Tirso respetivamente.

2. PROCEDIMENTO

2.1. Revisão Bibliográfica

Em antevisão do trabalho em baixo descrito foi feita a leitura e familiarização com a literatura referente à plataforma e dispositivos da WEG. A leitura incluí dois trabalhos feitos sobre a alçada da WEG e da WEGEURO com temas relevantes para o tema proposto.

Ainda foi elaborada uma vasta revisão bibliográfica com o objetivo de explorar possibilidades sobre a tecnologia apresentada, suas funcionalidades, que sistemas semelhantes foram implementados e explorados na literatura disponível e quais as ambições futuras para esta tecnologia. Para esta tarefa foi recorreu-se aos motores de busca Google Academic e Scopus acessando às bases de dados Elsevier, IEEE, Springer entre outros. Dos trabalhos recolhidos são de particular relevância os descritos nesta secção e mencionados ao longo do texto.

A supervisão de maquinaria para evitar perdas está bem documentada na área de fotovoltaicos, sendo um mercado em crescimento rápido nos últimos anos e suscetível a perdas de diversas formas, a sua manutenção e constante melhoria torna-se imperativo. No trabalho de C. Ventura, G.M. Tina (2016)^{vii} encontramos um sistema de supervisão através da potência debitada que permite alertar para a ocorrência de perdas e preparar a devida manutenção caso seja esse o caso.

IoT abre portas no que toca a gestão e supervisão dos recursos - “O fator de potência tipicamente aumenta com a carga do motor. Um número de motores de indução, a funcionar a baixa carga, podem causar que o sistema elétrico tenha um baixo fator de potência.”, IEC 60034 (2021) - Goma et al.^{viii} utilizaram dispositivos de IoT para medir em tempo real e filtrar harmónicos e garantir a qualidade da energia fornecida ao ativo, atingiram uma redução significativa dos harmónicos prejudiciais e conseguiram manter poder reativo a menos de 5%. Manutenção preditiva é a grande vantagem, mas além da mitigação de perdas por paragem, podemos utilizar esta ferramenta para otimizar energeticamente a nossa linha de produção e além^{ix}.

Na análise feita por Yao et al.^x é aplicado um modelo estatístico ao IPC (Índice de *Performance Chave*) de um compressor de gás que é estabelecido como o fluxo de gás pela turbina de admissão sobre o fluxo de gás à saída, o IPC é relacionado linearmente com fatores de influência adquiridos por medição direta durante o processo. Este estudo tem por objetivo obter uma redução custos energéticos na ordem dos 5%. Para o efeito são

utilizados dados históricos para definição da linha-base e posterior tomada de ação com visa a norma ISO 50001. O estudo foi bem-sucedido.

Eficiência energética está definida na norma ISO 14955 (2014) como “rácio ou outra relação quantitativa entre *output* de desempenho, serviço, produtos ou energia e *input* de energia.”, introduzindo a chegada de conceitos tais como indicadores energéticos como o SEC “specific energy consumption”, uma maneira de manter um controlo apertado sobre operações e os gastos destas. Liu et al.^{xi} vem a melhorar sobre este indicador num processo de corte onde introduz uma metodologia que melhor prevê os consumos de corte e auxiliares durante o processamento da peça.

2.1.1 WNOLOGY, MOTION FLEET MANAGEMENT E WEGSCAN

Wnology é a plataforma de *IoT* da WEG, nela podemos configurar dispositivos como sensores e *gateways* recorrendo a programação simplificada o utilizador pode seleccionar que dados deseja receber, com que frequência e como os dispor no seu ecrã recorrendo a *dashboards*, isto é, gráficos, medidores virtuais, etc.

Sobre esta plataforma a WEG desenvolveu o *Motion Fleet Management* (MFM) que é instalado em conjunto com *WEGScan's* (WS) para providenciar ao utilizador informação detalhada e em tempo real sobre os seus motores.

Estes sensores encaminham dados acerca dos motores para o *Motion Fleet Management* que processa e facilita a interação com o utilizador. O *Motion Fleet Management* é uma aplicação que mostra as possibilidades que a plataforma da WEG oferece, por diversas formas de apresentação o MFM executa duas funções, o armazenamento/comunicação de informação e a função de diagnóstico de motores, para a última recorre a inteligência artificial também desenvolvida pela WEG e completamente integrada na plataforma, a funcionalidade *Specialist*. O *Specialist* é uma poderosa ferramenta de diagnóstico que prevê falhas antes de elas se tornarem críticas permitindo à equipa de manutenção executar serviços antecipadamente e evitar paragens custosas, é uma ferramenta que torna os trabalhos de manutenção preditivos em oposição a reativos ou recorrentes a intervalos de tempo pré-determinados, poupando trabalho excessivo, diminuindo o *downtime* e tornando a máquina e os serviços de manutenção mais eficientes.

Além de prevenir falhas o *Specialist* possui outra funcionalidade, consegue estimar a carga de funcionamento e energia consumida com uma precisão de 10%. Isto significa que podemos obter dados históricos e em tempo real sobre o uso de cada ativo em cada processo produtivo, revertendo grande controlo sobre as operações fabris.

Aplicações programadas na *Wnology* ^{xiii} utilizam programação em linguagem *JavaScript* pré formatada sobre forma de módulos ilustrados na figura 1. Neste trabalho foi desenvolvido uma comunicação em *Wnology* de várias aplicações que representam *digital twins* das máquinas presentes e equipadas com sensores WS na fábrica de Santo Tirso 1. O trabalho original de integração de um *digital twin* em *Wnology* foi explorado por Adão ^{xiii} e explorado mais tarde neste trabalho.

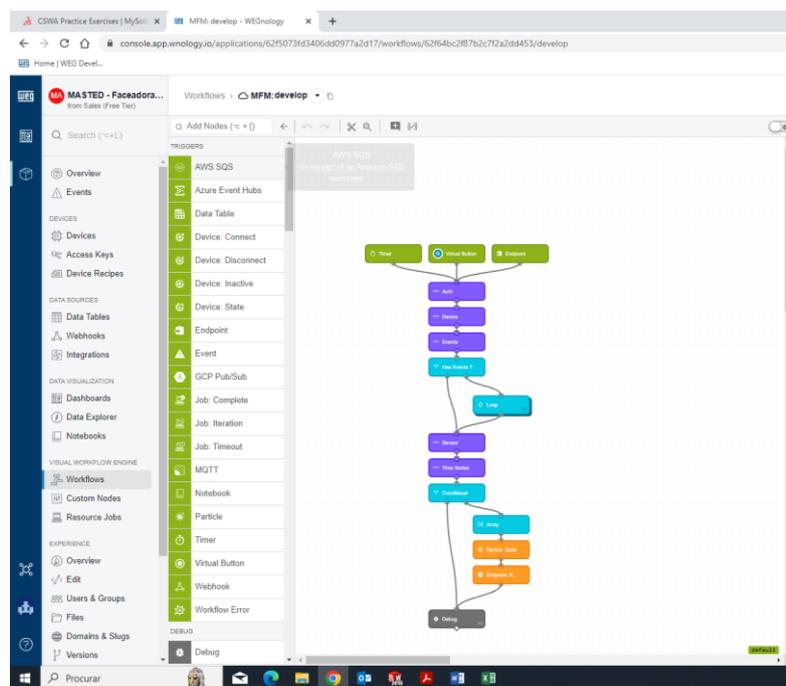


Figura 1 - Ambiente de trabalho da plataforma Wnology: workflow MFM

Dashboards são os instrumentos de visualização dos dados dos sensores, podem tomar várias formas que o utilizador entender de forma a facilitar a análise, eles recebem e armazenam os dados alocados aos atributos do dispositivo digital. Exemplos das formas de representação dos diversos dados são apresentados na figura 2.

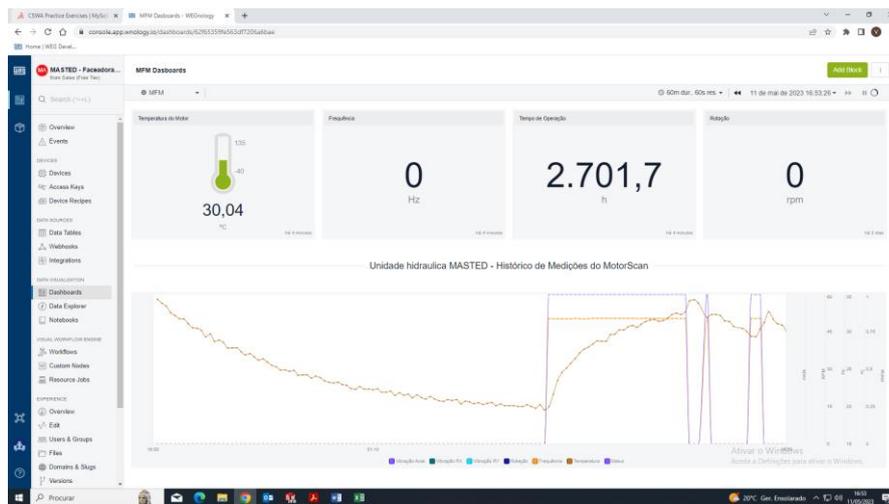


Figura 2– Ambiente de trabalho Wnology: Dashboards

Sobre esta base foi construído a plataforma MFM que apresenta mais funcionalidades para os seus utilizadores. Além de múltiplos sensores conectados e diversos *dashboards* associados aos dados de cada sensor, esta aplicação ainda tem funcionalidades que previnem e otimizam manutenção e permitem monitorizar os consumos energéticos, para tal recorre a *cloud computing* e à inteligência artificial *Specialist*^{xiv}. O *Specialist* é uma rede neuronal que recolhe informações sobre o campo magnético e as vibrações do motor, captadas pelo sensor e através de um algoritmo de rede neuronal e *machine learning*, retribui um diagnóstico, caso seja esse o caso, que no ativo podem haver falhas como: falha por lubrificação, falha no rolamento, desalinhamento, vibração externa, desbalanceamento, barras rompidas, batimento, folga das engrenagens.

O WEGscan é um sensor inteligente que permite obter informações relevantes do ativo via comunicação *wireless*. O sensor recolhe dados do ativo que pode tomar diversas formas, motores, redutores, ventiladores entre outros mais e consegue armazenar essa informação até um mês e transmiti-la a um *gateway* via *Bluetooth 5*, o qual, por sua vez, transmitirá à plataforma *Motion Fleet Management* onde poderão ser armazenados até um ano, sendo esta ligação assegurada por *Wi-fi* ou cabo *ethernet*. É nesta fase em que os dados são formalmente analisados e tomam valor para o cliente. A gama de dados recolhidos pelo aparelho são: vibrações em três eixos, leitura de campo magnético e temperatura em respeito a tempo assegurando uma caracterização completa do ativo.

Com o desenvolvimento deste sensor, a WEG criou e patenteou duas tecnologias inovadoras: o WEGsense e WEGsync. O WEGsync efetua uma análise de vibrações de vários sensores simultaneamente, isto capacita o cliente de estar consciente atempadamente de potenciais falhas devido desvio de fase ou deformação estrutural presentes do dispositivo que podem ocorrer devido a cargas excêntricas ou choques. O WEGsense alcança uma deteção prematura de defeitos como lubrificação defeituosa, através de algoritmos poderosos que em conjunto com os dados de vibrações diagnosticam a falha antes de ela causar danos maiores que requeiram tempo de paragem do ativo e manutenção corretiva. Esta tecnologia torna-se particularmente relevante quando se equaciona a instalação de motores de instalação complexa cuja manutenção pode ser particularmente custosa e se torna imperativo a prevenção de qualquer paragem inesperada.

O WS pode ser instalado em diversos dispositivos, máquinas variadas que possuam um motor elétrico, redutores, ventoinhas de ventilação e alarmes podem ser configurados para alertar os técnicos de potenciais problemas para que eles possam tomar medidas atempadamente.

Motion Fleet Management - MFM foi criado sobre a plataforma *Wnology* e transmite ao utilizador toda a informação referente ao seu ativo que tem WS instalado. Para fazer a supervisão de um motor de indução é necessário ter em conta todas as informações que o WS capta, alterações das vibrações podem alertar para diversos processos de falha assim como padrões de temperatura irregulares. Com o *software Specialist*, o MFM pode estimar as cargas a que o motor está sujeito e o seu consumo, esta informação torna-se relevante não apenas para fins de manutenção, mas também de gestão energética.

A funcionalidade WEG Exchange abre a porta a troca de dados com outras aplicações ou outros programas facilitando a complementação da análise feita.

2.2. Contextualização

Internet of things é uma expressão definida há algum tempo mas, como sempre se verifica, grandes mudanças levam tempo a serem implementadas e hoje já vemos este conceito a ser bem difundido na indústria^{xv} A sensorização de máquinas de legado já é efetuada de forma viável com mínimos custos^{xvi} e a monitorização torna-se mais generalizada e em tempo real. Sobre estas inovações novos conceitos e melhorias vieram a enraizar esta tecnologia bem na linguística industrial: RESTful API, computação em *cloud*, SCADA e computação assistida por inteligência artificial (IA) assim como o tratamento de dados em larga escala.

A observação em tempo real dos motores das máquinas traz consigo o advento de manutenção preditiva^{xvii} em que os planos de manutenção apenas são efetuados em função da condição atual do ativo. A manutenção geralmente praticada, preventiva, incorre no erro de manutenção excessiva numa tentativa de evitar paragens dispendiosas por avaria, ainda assim não trata completamente a ineficiência da avaria pois para garantir que esta não acontece terá de ser feita, a intervalos regulares a manutenção preventiva, muitas vezes desnecessária, a custos acrescidos. Com *IoT* e ferramentas de IA^{xviii} as empresas podem tomar mais partido do seu ativo a um custo reduzido, no entanto, esta tecnologia ainda possui defeitos em algumas questões:

Questões energéticas, um sistema de vários sensores espalhados por dezenas de motores ligados vinte e quatro horas por dia, a transmitir dados por *gateways* até servidores, acabam por consumir uma porção energética substancial. Já existe na literatura soluções para a problemática, desenvolvidas por vários autores.^{xix}

Outras técnicas, como gerir o grande volume de dados como filtra-lo e onde armazena-lo?

A solução da WEG a estas necessidades é o *WEGscan*^{xx}.

2.3. ISO 50001 – Eficiência energética

A tecnologia desenvolvida pela WEG vem possibilitar uma observação e acompanhamento em tempo real dos motores tanto a nível da de potenciais defeitos na operação como daquilo que consomem e produzem. Planos para no futuro instalar painéis solares fotovoltaicos nas novas instalações de Santo Tirso 1 dirigem a WEGeuro na rota da gestão inteligente de energia tanto a nível de consumidor como de produtor.

Por estes factos torna-se pertinente o acompanhamento das linhas-guia que a norma ISO 50001 (2018) veio introduzir. Um método padronizado de tomar consciência da eficiência energética ao nível institucional. Esta diretiva promove o desenvolvimento contínuo da melhoria da eficiência energética da empresa através a sua monitorização e comparação.

A norma visa a implementação de um sistema de gestão energética que faça monitorização e permita a elaboração de propostas de melhoria/otimização numa perspetiva energética e/ou ambiental. Além disto a norma também visa a melhoria contínua e uma atitude interventiva da parte da direção da empresa. Para o fim mencionado acima é proposta uma metodologia abrangente e transversal que guia o gestor na elaboração de uma Linha-base (LB) por onde guiar a gestão da energia. Esta linha base é calculada por diversos Indicadores de Performance Chave^{xxi} (IPC's) que caracterizam os processos e os fatores que influenciam a eficiência energética.

Aqui depreendeu-se que a tecnologia Wnology e WS seriam candidatos preferíveis para ajudar a determinar esta linha base e mais importantemente, delinear uma base onde construir medidas de melhoria. O objetivo delineado será de construir um LB para a fábrica de Santo Tirso 1 e com ela observar oportunidades de melhoria.

2.3.1. IPC's e linha-base:

Esta metodologia encontra-se bem documentada na literatura: Kasturi e Kannappan^{xxii} desenvolveram em consonância com a norma um IPC o qual denominaram

eSEC (*Equivalent Specific Energy Consumption*) com o qual calcularam a linha-base para uma fábrica têxtil. Este IPC veio substituir o tradicional SEC para acomodar a variabilidade inerente a um processo produtivo complexo. Para tal foram estabelecidos IPC's e subIPC's escolhidos de acordo com a sua influência no indicador de performance da fábrica total. Os autores conseguiram identificar os fatores influenciadores do consumo específico e através de regressão multi-linear conseguiram obter previsões de resultados do seu IPC com erro dentro dos 10%.

Valencia et al.^{xxiii} usaram uma aproximação simplificada para calcular a linha-base de energia para uma petroquímica na Colômbia baseada no método de produção equivalente e com regressão linear.

Abraham et al.^{xxiv} conseguiram aplicar as práticas delineadas pela ISO 50001 e linha-base para estimar potenciais ganhos (poupanças) na energia total consumida e nas zonas de maior consumo de uma fábrica de aço.

Castrillon e Mendonza^{xxv} é outro exemplo da utilização de regressão linear para obter uma linha-base de energia para guiar decisões acerca de eficiência energética.

Na literatura existem versões variadas de soluções para esta problemática. Sendo a norma transversal a qualquer área de produção desde serviços a transformação metalúrgica, há necessidade de procurar uma solução adequada a cada empresa, cada linha produção e cada máquina e protocolo seguido pelos seus órgãos. Assim descobriu-se vários IPC's válidos para o presente estudo e pelos quais se pôde orientar a solução para o caso particular da WEGEURO. Em Santo Tirso encontra-se a produção de motores de baixa tensão – motores de indução elétrica de voltagens até 1100V - da linha WEG, dentro da WEGEURO esta é atualmente a linha mais automatizada mas ainda assim o processo produtivo é regido pelo modelo MTO – *made to order* - assim, e sendo bem documentado pela literatura, o SEC – *specific energy consumption* – será o indicador que melhor representa o processo produtivo.

Para obter o SEC são requeridas duas informações:

$$SEC = \frac{\textit{unidades produzidas}}{\textit{Consumo elétrico}}$$

Estes dados de produção serão retirados dos módulos SFM(*shop floor manager*) cuja interface com Wnology também foi explorada por Adão (2022).

Para além de IPC's energéticos, haverá um número de indicadores nomeadamente ambientais pelos quais poderíamos traduzir os consumos e impactos da empresa, sendo que essa análise já não se enquadra na abrangência deste trabalho será deixada para trabalhos futuros em indústrias de maior impacto ambiental, sendo que o principal impacto ambiental da WEGEURO é causado pelo consumo de energia elétrica.

A linha-base é calculada algebricamente a partir dos IPC's e de um modelo matemático, o desafio que apresenta na escolha deste problema está na correlação dos resultados com uma linha que os represente com um erro mínimo. À semelhança do tema anterior, na literatura estão presentes diferentes respostas para o cálculo da linha-base, no entanto, com menos variabilidade visto que muitas vezes a solução matemática tem por base uma regressão multi-linear. Assim será feita a tentativa de obter resultados positivos usando a mesma metodologia.

Trabalho de Adão (2022)

Adão (2022) elaborou um processo em Wnology para representar digitalmente a máquina faceadora MASTED, um *digital twin*, no processo adquiriu informações já recolhidas por dois sistemas: MFM e SFM (*Shop Floor Management*).

MFM *workflow* – *Workflows*, representados na figura 8 são a programação que possibilita as funcionalidades da plataforma. Para pedir informações aos sistemas anteriormente referidos são criados dois *workflows* independentes que requisitam informações a intervalos constantes. A figura 3 é um exemplo de descrição de uma base de dados em JSON, é conveniente representar uma parte da base de dados que utiliza.

O *workflow* do MFM começa com um módulo de autenticação em que o utilizador efetua um login para ter acesso aos dispositivos na rede. O segundo módulo vai requisitar um determinado dispositivo, uma faceadora Masted neste caso, utilizando a identificação do dispositivo já configurado via MFM *Exchange*. O módulo *Exchange* é como a plataforma recebe e transmite informação para serviços exteriores. O programa requisita as informações do sensor e recebe os dados sob forma de *payload* em formato JSON.

```
{
  "name": "John Doe",
  "age": 30,
  "email": "johndoe@example.com",
  "address": {
    "street": "123 Main Street",
    "city": "New York",
    "state": "NY",
    "zip": "10001"
  },
}
```

Figura 3 - Exemplo de pares atributo-valor JSON.

Os dois módulos seguintes, como ilustrado na figura 4, formam um *loop* para verificar a existência de eventos que representam alarmes que são pré-definidos na plataforma MFM quando o utilizador quer garantir que determinadas condições de trabalho não são ultrapassadas, por exemplo, limites de temperatura máxima que alertariam o utilizador que o ativo estaria mais quente que o desejado e isso poderia significar uma falha iminente. Finalmente os dois seguintes módulos fazem as respetivas ações: Alocar o sensor associado ao dispositivo e aceder as informações que esse sensor está a transmitir. Isto é feito á semelhança do módulo “*devices*” por pedido HTTP e o resultado final é a payload do sensor. O módulo “*device-state*” aloca as informações desejadas e acopla-as a determinados atributos do dispositivo digital que são utilizados para elaborar *dashboards* sendo os restantes blocos irrelevantes para este trabalho.

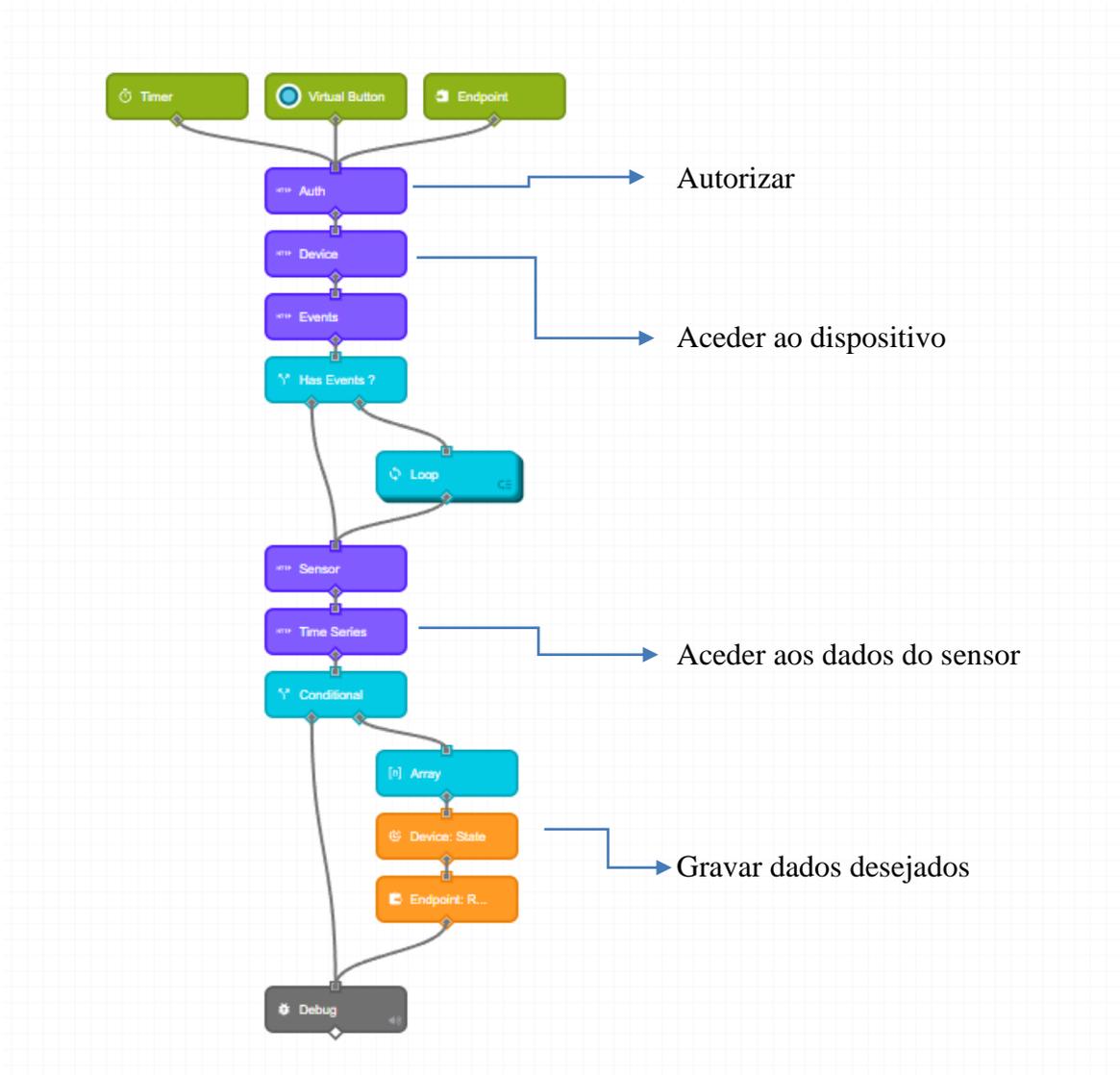


Figura 4 – Exemplo workflow usado.

2.4. Contexto energético da fábrica de Santo Tirso

2.4.1. Auditoria energética EDP

O custo de eletricidade agrega até 96% do custo total do ciclo de vida de um sistema movido por motor elétrico (IEC - 60034-31 (2021))^{xxvi}, esta informação ilustra a necessidade de garantir que estes sistemas funcionem da forma mais eficiente possível. A WEGeuro produz os motores que impulsionam parte significativa da indústria da vida moderna além da própria operação e portanto procura formas de continuamente progredir nesta missão. Com a criação do WS a WEG viu a oportunidade de explorar a melhor gestão dos seus próprios recursos energéticos. Para o ano fiscal de 2020 foi elaborada uma auditoria, de caráter energético, à fábrica de Santo Tirso da WEGeuro, foram contabilizados os consumos e propostas medidas de melhoria para reduzir a pegada ambiental da instalação. A auditoria foi executada por alçada da EDP Comercial.

Durante a análise foram discernidos os diversos consumidores dentro da área produtiva e os seus respetivos consumos representados na figura 3. Com esta informação pôde-se identificar locais de melhoria.

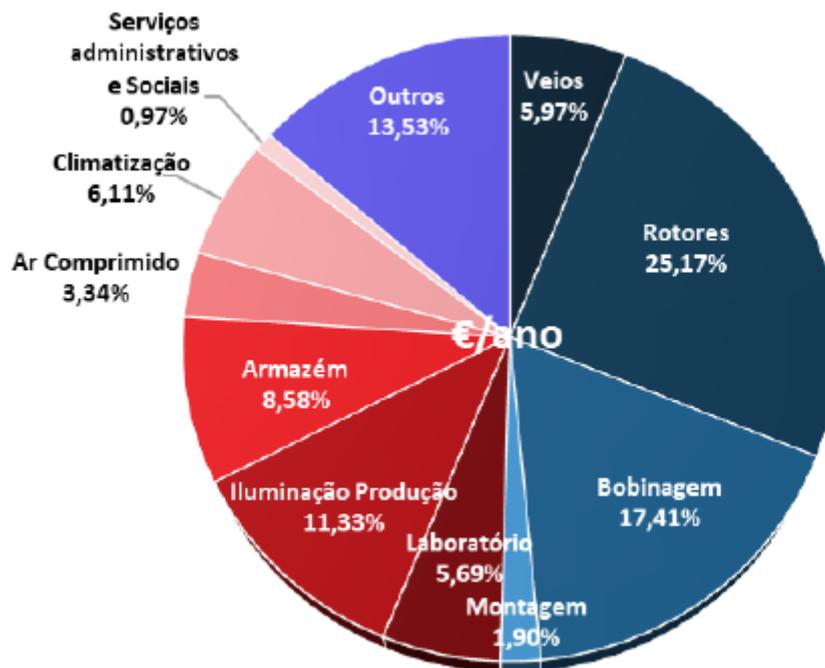


Figura 5 - Consumo percentual energético

2.4.2 Processo Produtivo

Nesta secção ir-se-á descrever a pormenor o processo produtivo do fabrico de um motor genérico para contextualizar a implementação e o papel do WS e MFM dentro do chão de fábrica.

A primeira peça do processo é a maquinação do veio em aço bruto, que é cortado ao comprimento desejado, facejado e torneado e maquinados pequenos detalhes de acordo com os desenhos técnicos, após este processo o veio é levado para a zona de rotores. A massa (rotor sem veio) é aquecida em estufas. O veio é introduzido na massa dilatada e levado a choque térmico sendo rectificadado o veio após o mergulho. O fluxo de trabalhos é ilustrada na figura 6.

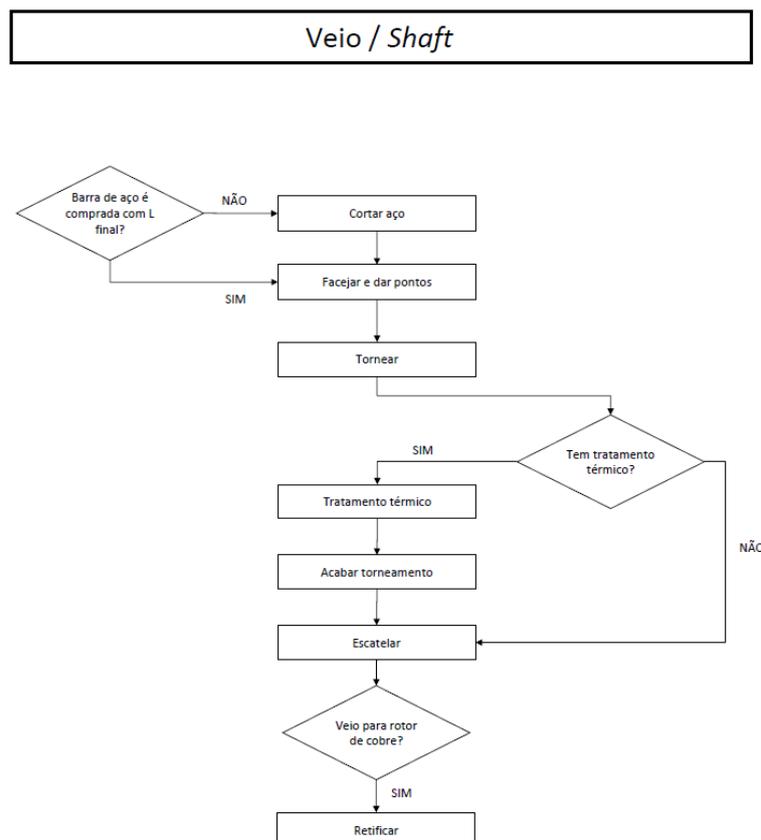


Figura 6 - processo produtivo do rotor

A segunda parte do fabrico de um motor de indução trata-se da bobinagem do estator, ilustrado na figura 7, um processo maioritariamente manual que termina na impregnação, (processo em que é introduzido material isolante na forma líquida para que este se infiltre nas fendas dos fios de cobre) em câmaras para o efeito que mantém o ambiente quente durante o processo. Durante esta etapa o estator é mantido em rotação leve na câmara por ação dos motores definidos mais a frente como “gotas”, nome referente às câmaras de impregnação.

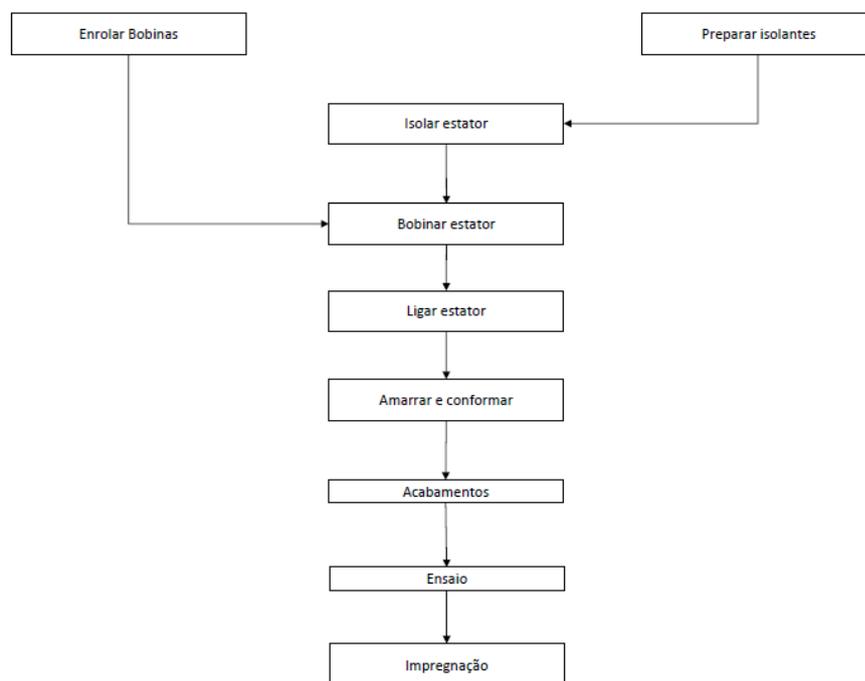


Figura 7 - processo produtivo da bobinagem do estator

Segue – se a fase de montagem, o rotor é introduzidos na carcaça, acabamentos finais, pintura e testagem são feitas para finalizar o produto.

Feito o levantamento dos processos primeiramente foram identificados os grandes consumidores de energia na fábrica, para tal recorreu-se a dados do MFM e o relatório da EDP.

A imagem 5 identifica a distribuição do consumo total elétrico, os principais consumos sendo a linha de produção, ou seja, rotores, veios, bobinagem e montagem sendo

os restantes intervenientes relevantes a iluminação, o sistema AVAC e o laboratório. Dentro da bobinagem e rotores um grande consumo vem na forma de produção de calor que alimenta as estufas e “gotas” (cabines de impregnação) e serão ignorados dentro do trabalho presente por não serem gastos diretamente ligados à zona de ação da plataforma MFM nem dentro das principais funcionalidades do WS. Tendo em conta o ponto anterior é notado que o período de funcionamento, temperatura e modos de funcionamento são parâmetros possíveis de integrar via a plataforma Wnology e cujo acompanhamento é do interesse de gestão energética mas, no entanto, não será feita esta abordagem no contexto particular deste trabalho. Nos demais AVAC, laboratório e trabalho dos veios será onde se identificam a maioria dos dispositivos (motores) cujo WS foi instalado e apresentam já dados fornecidos consistentemente, estes serão o alvo da análise deste trabalho.

2.4.2.1. Medidas

Em coerência com a metodologia PDCA da norma ISO 50001 que estipula os passos *Plan Do Check Act* e resultante da análise da auditoria resultaram tomadas de ação para reduzir o volume energético consumido na WEGEURO.

Para reduzir os consumos de ar comprimido foi reduzida a pressão dos terminais e feita a consciencialização dos colaboradores dos consumos atuais.

A segunda medida foi a integração de sensores de temperatura nas estufas e “gotas” para limitar tempos de abertura e controlar a temperatura interior precisamente, evitando gastos desnecessários para os processos.

Finalmente foi planeada a implementação de uma instalação de painéis solares para autoconsumo, todos estes processos podem ser incluídos nos passos *Plan e Do* sendo os seguintes verificar o efeito das mudanças e agir de acordo. A inclusão destas medidas reverte para o envolvimento da direção da entidade regulada que é frisada no texto da norma.

2.4.3. Intervenientes - Máquinas

O processamento inicial do veio parte do respetivo material em bruto ser maquinado pela faceadora MASTED que processa as faces de base e topo da peça.

A máquina está equipada com dois motores de 2,2 kW, um de 4kW e um de 11kW visíveis nas figuras 8 e 9.



Figura 9 - motor 11kW



Figura 8 - motores 2kW e 4kW

Após esta primeira fase o veio passa por mais duas maquinações em máquinas ferramenta Eumach e torno Hwacheon até obter o veio final. Estes processos são regidos pela alimentação da máquina pelo operário, escolha do programa em função da finalidade de cada veio e a máquina faz o resto de forma automática que é a única altura em que os motores da mesma estão ativos, estes processos demoram <10 minutos para a Eumach e entre 30 a 40 minutos para o torno.

Após de serem introduzidos pela prensa cujo o processo é muito rápido (<5min) o processo seguinte é o aquecimento na estação de choque térmico. O aquecimento é feito por indução magnética com o rotor em rotação proporcionada por um motor WEG antes de ser mergulhado na solução refrigerante, no entanto também este processo é breve (<5min). A parte da bobinagem como já mencionado é maioritariamente efetuado pelas funcionárias e funcionários manualmente.

Na parte do estator, a carcaça é torneada na parte interior no torno WEG num processo que varia com o tamanho das mesmas, no entanto, em geral não atinge 1 hora para

terminar um processo. Na prensagem em que o rotor é introduzido no estator os tempos também geralmente ficam abaixo dos 5 minutos.

Por fim, as gotas possuem motores que mantêm os rotores a girar durante a parte de isolamento por impregnação, os processos duram entre 20 a 40 minutos.

Para uma análise energética é necessário o motor estar instalado com pelo menos um WS e ter acesso à subscrição “Specialist”. Os motores que obedecem a estas condições são:

Tabela 1 – Máquinas sensorizadas intervenientes.

Motor Torneadora WEG	37kW	IE 3	4 pólos
Mot.Unid.HidráulicaMASTED	11kW	IE3	4 pólos
Prensa Intro. Estatores	22kW	IE3	4 pólos
Mot.Unid.ÓleoDeCorteMASTED	4kW	IE2	2 pólos
Unid. Corte MASTED	2,2kW	IE2	2 pólos
Bomba 2 MASTED	2,2kW	IE2	2 pólos
Gotas n°3	0,75 kW	IE1	4pólos
Gotas n°4	0,75 kW	IE1	4pólos

Utilizando os dados presentes na plataforma foram analisados os gráficos de consumo e carga numa semana representativa do funcionamento dos motores. O período selecionado foi a semana de 16 a 24 de Janeiro e a imagem 10 e 11 contêm dois dos gráficos obtidos.

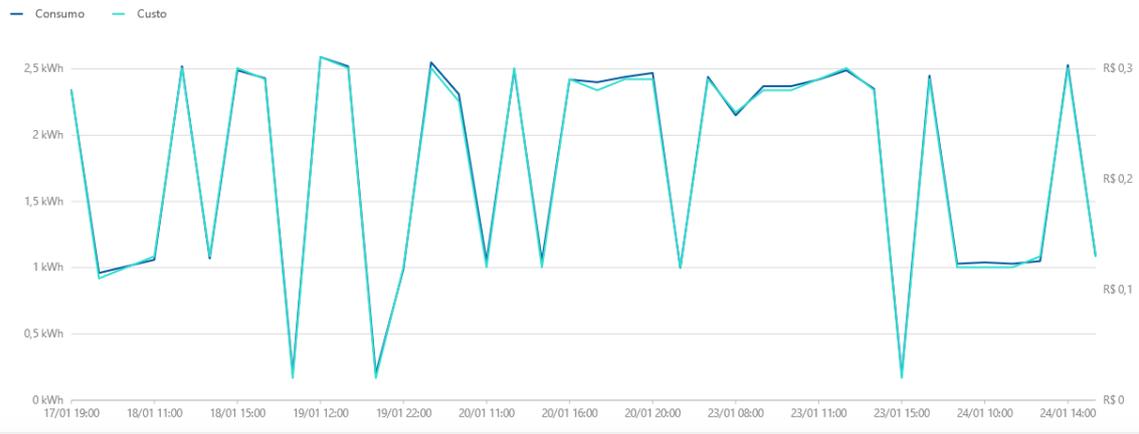


Figura 10 – Gráfico de consumos na semana 16 a 24 de Janeiro de 2023 da bomba 2 da máquina MASTED.

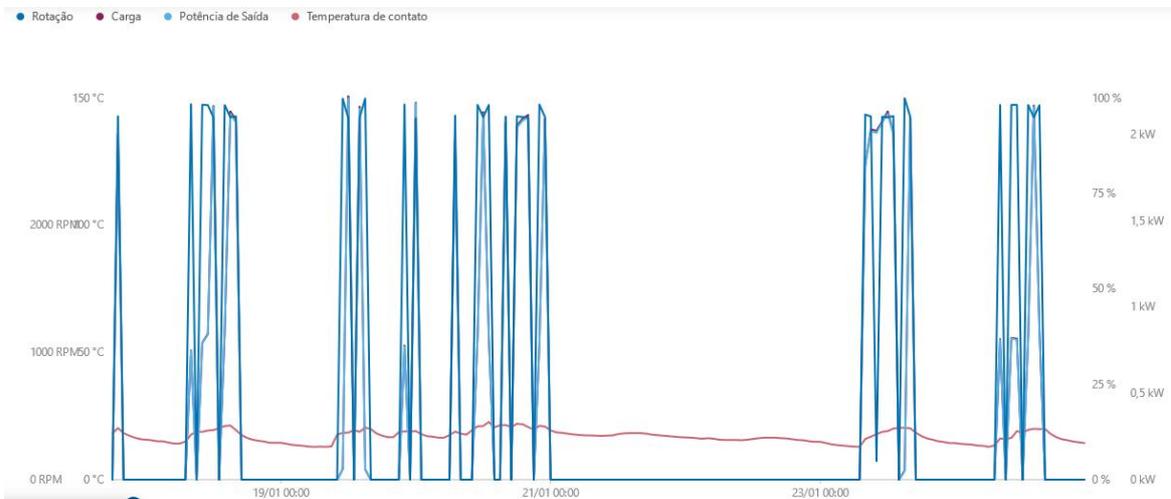


Figura 11 – gráfico de Carga/Potência de saída/Velocidade de rotação/Temperatura de operação na semana de 16 a 24 de Janeiro do motor da bomba 2 da máquina MASTED

O perfil de carga permite retirar conclusões sobre a eficiência utilizando os gráficos de eficiência da máquina correspondente e concluir se está bem dimensionada para o ciclo de trabalhos exercido. Com o perfil de consumos podemos estimar se uma substituição do motor se prova viável, a substituição terá duas vertentes: Subida da classificação IE;

Dimensionar adequadamente a potência do motor à potência necessária durante os ciclos de esforço.

Apesar de elevadas eficiências já serem apresentadas (classificação IE 3 por exemplo) é notado que em motores particularmente de grande utilização a melhoria marginal de alguns pontos percentuais na eficiência do motor pode traduzir-se em reduções significativas nas perdas do ativo em valores na ordem dos 20% para motores de grande utilização (IEC 60034-31) sendo por isso pertinente essa análise, mesmo esse não sendo o caso.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Replicação

O desafio do trabalho como descrito em cima trata de receber informações das diversas máquinas e processos da fábrica, assim, o trabalho acima descrito foi replicado para as máquinas instaladas com o WS. Utilizando dados da plataforma MFM foram selecionados os sensores já conectados com o specialist para expandir a frota de digital twins e agregar os dados de consumo do maior número de máquinas possível.

Na plataforma Wnology para a criação de um digital twin o primeiro passo é a criação de uma aplicação, preenchimento da identificação da mesma e somos levados de seguida para a página de *overview*. Inicialmente não existem componentes, o primeiro a ser criado será o dispositivo digital, este guardará os dados alocados em pares atributo – valor.

Existem vários tipos de dispositivos, mas apenas são relevantes para o trabalho exposto os tipos *standalone* e *system*.

O dispositivo *standalone* será o mais comum e representa um componente real ou digital conectado por MQTT ou REST API que transmite dados. Este seria o “coração” dos digital *twins* que foram elaborados.

O dispositivo do tipo *system* foi utilizado para representar o sistema de gestão energética, este recolhe dados das restantes aplicações a si associadas, encontra-se um nível acima das restantes aplicações e representa um dispositivo apenas digital.

Para configurar o acesso aos dados de cada máquina sensorizada foi necessário recorrer ao módulo *Exchange* do MFM que detém todas as identificações digitais de cada máquina. Utilizando uma conta *exchange* e *token* (chave) para efeitos de autenticação e foram levantadas as identificações dos dados da fábrica de Santo Tirso.

Até atingir o limite de dispositivos foram criados um para cada máquina já associada ao MFM nomeadamente:

- MASTED bomba 2
- Compressor 1
- MASTED unidade de óleo
- Eumach hidraulica
- Gota nº 4
- Gota nº 3
- Insuflação cabine pintura 1
- Prensa de introdução de estatores

O passo seguinte na preparação do dispositivo digital foi configurar os seus atributos (dados que queremos coletar) e o workflow que irá atribuir dados de uma payload ou pacote de dados transmitido do sensor real para o MFM e do MFM para a nossa aplicação através da comunicação Exchange. Depois certificou-se que a identificação inserida no módulo “device” do workflow conferia com a máquina desejada visualizando no pacote de dados a identificação do dispositivo. O workflow utilizado em todos os dispositivos foi em tudo semelhante ao demonstrado na secção anterior.

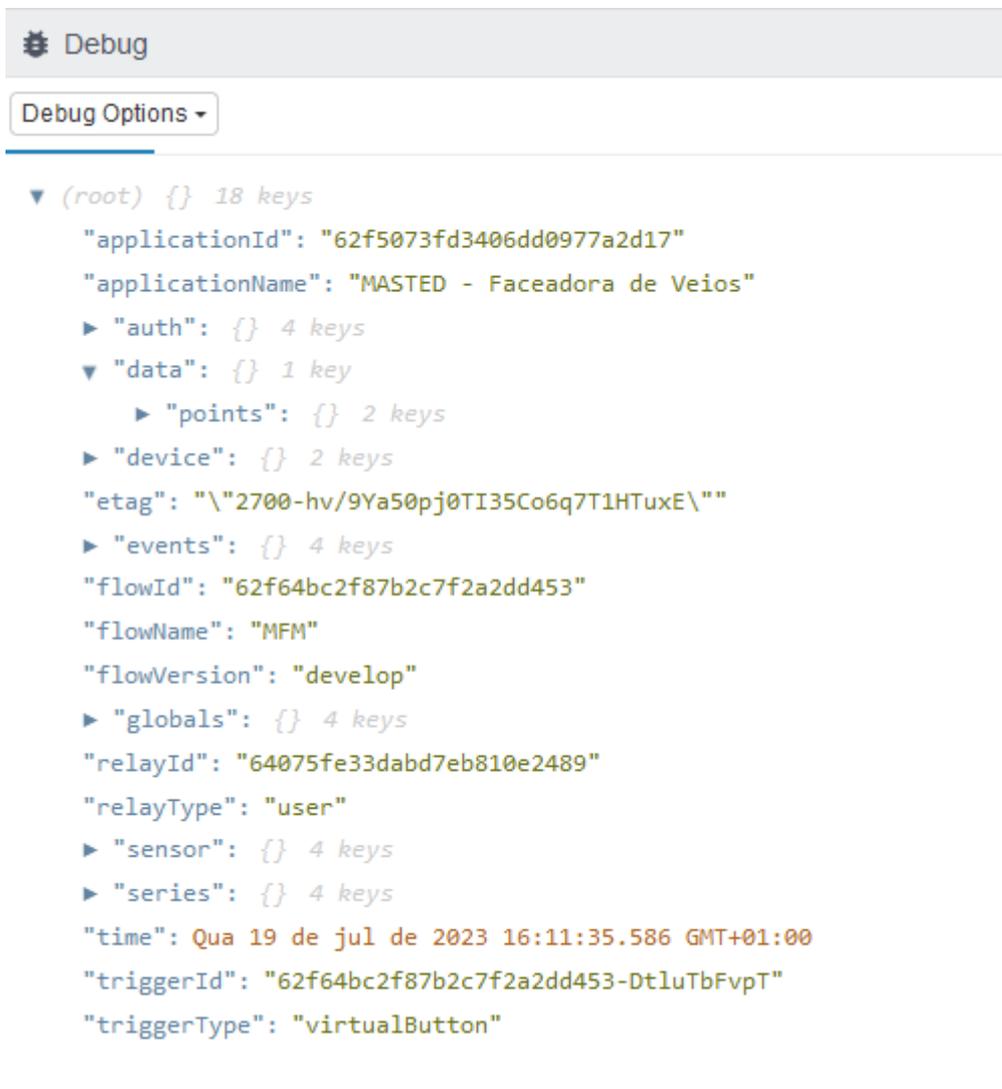
Com as máquinas configuradas e a transmitir, surge a nova tarefa de tratamento dos dados, pode esta ser feita dentro da plataforma ou é necessário exportar os dados para um programa exterior como excel?

A plataforma abre a possibilidade de correr código javaScript através do módulo function, no entanto, devido a dificuldades com a importação de bibliotecas necessárias ao programa de regressão linear que será exposto noutra secção foi tomada a opção de exportar como csv os dados recolhidos.

O sensor guarda dados até um mês e a plataforma MFM^{xxvii} pode guardar até um ano de dados. Assim o objetivo seria sempre de recolher o máximo de dados possível e obter acesso aos dados históricos dos últimos doze meses.

Payload – o pacote de dados recebido em cada um dos digital twins tem o aspecto ilustrado na figura 12 e transmite na diretoria do time-series (figura 13) 144 pontos que correspondem a atualizações de 10 em 10 minutos do estado da máquina durante um dia. Neste intervalo são comunicados dados como temperatura de superfície, tempo de

operação a hora e os limites de operação em que o ativo deve estar a funcionar no que toca a vibração nos três eixos, temperatura, ilustrado na figura 14.



```
Debug
Debug Options ▾
▼ (root) {} 18 keys
  "applicationId": "62f5073fd3406dd0977a2d17"
  "applicationName": "MASTED - Faceadora de Veios"
  ▶ "auth": {} 4 keys
  ▼ "data": {} 1 key
    ▶ "points": {} 2 keys
  ▶ "device": {} 2 keys
  "etag": "\"2700-hv/9Ya50pj0TI35Co6q7T1HTuxE\""
  ▶ "events": {} 4 keys
  "flowId": "62f64bc2f87b2c7f2a2dd453"
  "flowName": "MFM"
  "flowVersion": "develop"
  ▶ "globals": {} 4 keys
  "relayId": "64075fe33dabd7eb810e2489"
  "relayType": "user"
  ▶ "sensor": {} 4 keys
  ▶ "series": {} 4 keys
  "time": Qua 19 de jul de 2023 16:11:35.586 GMT+01:00
  "triggerId": "62f64bc2f87b2c7f2a2dd453-DtluTbFvpT"
  "triggerType": "virtualButton"
```

Figura 12 – payload da máquina MASTED

```
payload : 040731e330d007e0010e2407
"relayType": "user"
▶ "sensor": {} 4 keys
▼ "series": {} 4 keys
  ▼ "body": {} 1 key
    ▼ "result": {} 6 keys
      "aggregation": null
      ▼ "devices": {} 1 key
        ▼ "6217a08e2e1f52112e84cc47": {} 3 keys
          "name": "Masted_Unidade Hidraulica"
          ▼ "points": [] 143 items
            ▶ 0: {} 2 keys
            ▶ 1: {} 2 keys
            ▶ 2: {} 2 keys
            ▶ 3: {} 2 keys
            ▶ 4: {} 2 keys
            ▶ 5: {} 2 keys
            ▶ 6: {} 2 keys
```

Figura 13 – Directoria “series” da payload.

```
▼ "points": [] 143 items
  ▼ 0: {} 2 keys
    ▼ "data": {} 17 keys
      "environmentTemperature": 32.2
      "fundamentalFrequency": 50.19
      "gatewayId": "6255923520e121a2afbe95ac"
      "gatewayName": "Gateway 4"
      "lastTimestamp": "Tue Jul 18 2023 15:20:00 GMT+0000 (UTC)"
      "motorTemperature": 34.3
      "operationTime": 3097.3333333333335
      "surfaceTemperature": 37.08618806924388
      "surfaceTemperatureThresholdCritical": 75
      "surfaceTemperatureThresholdWarning": 50
      "timestampGateway": "2023-07-18T15:11:24.000Z"
      "velXThresholdCritical": 8.88
      "velXThresholdWarning": 5.63
      "velYThresholdCritical": 8.88
      "velYThresholdWarning": 5.63
      "velZThresholdCritical": 8.88
      "velZThresholdWarning": 5.63
    "time": "2023-07-18T15:20:00.000Z"
  -- ... --
```

Figura 14 – Diretoria do Ponto 0 da payload.

```

▼ 4: {} 2 keys
  ▼ "data": {} 24 keys
    "accelerationX": 0
    "accelerationY": 0
    "accelerationZ": 0
    "environmentTemperature": 35.4
    "fundamentalFrequency": 0
    "gatewayId": "6255923520e121a2afbe95ac"
    "gatewayName": "Gateway 4"
    "lastTimestamp": "Tue Jul 18 2023 16:00:00 GMT+0000 (Coordin
    "motorTemperature": 36.2
    "operationTime": 3097.3333333333335
    "speed": 0
    "surfaceTemperature": 37.2235071900485
    "surfaceTemperatureThresholdCritical": 75
    "surfaceTemperatureThresholdWarning": 50
    "timestampGateway": "2023-07-18T16:16:30.000Z"
    "velX": 0
    "velXThresholdCritical": 8.88
    "velXThresholdWarning": 5.63
    "velY": 0
    "velYThresholdCritical": 8.88
    "velYThresholdWarning": 5.63
  
```

Figura 15 – Directoria do ponto 4 (hora certa) dentro da payload.

Dentro destes pontos existem, de hora a hora, payloads com mais pares atributo-valor que o normal como na figura 15. Estes incluem as estimativas de carga, consumo e velocidade de rotação do ativo. Estes dados permitirão a análise feita na secção seguinte, no entanto, os dados utilizados não foram recolhidos deste forma por não ter sido possível obter dados históricos desta forma.

Como descrito na secção referente ao processo produtivo, as operações nas diversas máquinas podem variar entre 20min a uma hora, é denunciado que a taxa de aquisição de dados de consumo e estado de funcionamento do ativo é severamente insuficiente para caracterizar os processos presentes no contexto da WEGEURO, no entanto, quando referido ao suporte feito pela filial mãe no Brasil não foi obtido resposta quanto à variação deste intervalo, além do mais, como consta em Oliveira e Nied o algoritmo consome dados amostrados de uma hora, ou seja, requiere uma hora de dados transmitidos (com o limite de

transmissão do WS de 10 isto representa 10 pontos para cada atributo) para retornar um valor, pelo que este representa o limite da sua operação e é por isso concluído pelos autores que não se adequa a máquinas sem pelo menos algumas horas de funcionamento e naturalmente apenas teríamos um funcionamento bem caracterizado na ordem das 10 horas para cima resultando numa taxa de aquisição de 10%. Isto significa que as análises subsequentes se destinam a representar o que poderia ser feito apenas. Além ainda deste facto, é mencionado que visto funcionar por uma rede neuronal é incerta a caracterização da energia consumida, se é um valor médio ou um valor exato. Para as análises no presente trabalho foi assumido um valor exato da hora dado que este possui as unidades de kWh na plataforma.

Para tomar uso dos dados recolhidos pela plataforma para o cálculo de indicadores coerentes com a norma 50001 foi aferido a possibilidade de manipula-los dentro e fora da plataforma.

Primeiro os métodos de extração foram avaliados, é possível aceder a dados históricos que estão guardados na plataforma MFM? É possível automatizar o processo dessa recolha?

Questionamento aos técnicos no Brasil gerou respostas inconclusivas e, portanto, foram testadas algumas alternativas:

Utilização do módulo “CSV:Encode” – Este módulo permite ao utilizador aceder a parte da payload e gerar uma string de texto csv em que os diferentes pontos são separados por um separador especificado, neste caso “\n”. A string obtida é gravada na payload e pode ser copiada e colada para fora originando o texto na figura 16:

```

Txfinal.txt - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
[Time,data,'023-04-27T15:40:00.000Z,n
{fundamentalFrequency:0,status:0,operationTime:4095.3333333333335,surfaceTemperature:38.533720753974265,velXThresholdWarning:5.625,velYThresholdWarning:5.625,velZThresholdWarning:5.625,velXThresholdCritical:8.875,velYThresholdCritical:8.875,velZThresholdCritical:8.875,surfaceTemperatureThresholdWarning:60,surfaceTemperatureThresholdCritical:75,lastTimestamp:Thu Apr 27 2023 15:40:00 GMT+0000 (Coordinated Universal Time),gatewayId:62557a09e1f1e05fa11e26cb.gatewayName:Gateway 2,calculatedEnvironmentTemperature:21.37725020822404,timestampGateway:2023-04-27T15:25:26.000Z}','023-04-27T15:50:00.000Z,n
{fundamentalFrequency:0,status:0,operationTime:4095.3333333333335,surfaceTemperature:39.626398367657586,velXThresholdWarning:5.625,velYThresholdWarning:5.625,velZThresholdWarning:5.625,velXThresholdCritical:8.875,velYThresholdCritical:8.875,velZThresholdCritical:8.875,surfaceTemperatureThresholdWarning:60,surfaceTemperatureThresholdCritical:75,lastTimestamp:Thu Apr 27 2023 15:50:00 GMT+0000 (Coordinated Universal Time),gatewayId:62554b24939b5f81ced234ba.gatewayName:Gateway 1 - Montagem,calculatedEnvironmentTemperature:27.570500146319606,timestampGateway:2023-04-27T15:28:07.000Z}','023-04-27T16:00:00.000Z,n
{fundamentalFrequency:34.99,status:1,operationTime:4095.5,accelerationX:0.04435294117647059,accelerationY:0.04435294117647059,accelerationZ:0.04435294117647059,speed:1042.4,surfaceTemperature:36.62377339560449,velX:3.156862745098039,velY:2.607843137254902,velZ:2.058823529411765,velXThresholdWarning:5.625,velYThresholdWarning:5.625,velZThresholdWarning:5.625,velXThresholdCritical:8.875,velYThresholdCritical:8.875,velZThresholdCritical:8.875,surfaceTemperatureThresholdWarning:60,surfaceTemperatureThresholdCritical:75,lastTimestamp:Thu Apr 27 2023 16:00:00 GMT+0000 (Coordinated Universal Time),banding:0.2575568443192487,cluster:3,outlier:0,unbalance:0,misalignment:0,bearing:0,activeField:0,unknown:0,gatewayId:62557a09e1f1e05fa11e26cb.gatewayName:Gateway 1 - Montagem,calculatedEnvironmentTemperature:26.73494188844594,unbalanceMovingAverage:-5,misalignmentMovingAverage:-5,bearingMovingAverage:-5,unknownMovingAverage:-5,activeFieldMovingAverage:0,timestampGateway:2023-04-27T16:06:28.000Z,race:100,rateGroups:[{cluster:0,low:0,high:321,rate:100},n{cluster:1,low:321,high:643,rate:0},n{cluster:2,low:643,high:964,rate:0},n{cluster:3,low:964,high:1286,rate:100},n{cluster:4,low:1286,high:1607,rate:0}],}'023-04-27T16:10:00.000Z,n
{fundamentalFrequency:35.2,status:1,operationTime:4095.6666666666665,surfaceTemperature:36.26311106666666,velXThresholdWarning:5.625,velYThresholdWarning:5.625,velZThresholdWarning:5.625,velXThresholdCritical:8.875,velYThresholdCritical:8.875,velZThresholdCritical:8.875,surfaceTemperatureThresholdWarning:60,surfaceTemperatureThresholdCritical:75,lastTimestamp:Thu Apr 27 2023 16:10:00 GMT+0000 (Coordinated Universal Time),gatewayId:62554b24939b5f81ced234ba.gatewayName:Gateway 1 - Montagem,calculatedEnvironmentTemperature:24.474439616437415,timestampGateway:2023-04-27T15:51:37.000Z}','023-04-27T16:20:00.000Z,n
{fundamentalFrequency:35.09,status:1,operationTime:4095.6333333333335,surfaceTemperature:36.390526955461894,velXThresholdWarning:5.625,velYThresholdWarning:5.625,velZThresholdWarning:5.625,velXThresholdCritical:8.875,velYThresholdCritical:8.875,velZThresholdCritical:8.875,surfaceTemperatureThresholdWarning:60,surfaceTemperatureThresholdCritical:75,lastTimestamp:Thu Apr 27 2023 16:20:00 GMT+0000 (Coordinated Universal Time),gatewayId:62554b24939b5f81ced234ba.gatewayName:Gateway 1 - Montagem,calculatedEnvironmentTemperature:24.21629542693239,timestampGateway:2023-04-27T15:58:38.000Z}','023-04-27T16:30:00.000Z,n
{fundamentalFrequency:35.15,status:1,operationTime:4096,surfaceTemperature:36.81859546762487,velXThresholdWarning:5.625,velYThresholdWarning:5.625,velZThresholdWarning:5.625,velXThresholdCritical:8.875,velYThresholdCritical:8.875,velZThresholdCritical:8.875,surfaceTemperatureThresholdWarning:60,surfaceTemperatureThresholdCritical:75,lastTimestamp:Thu Apr 27 2023 16:30:00 GMT+0000 (Coordinated Universal Time),gatewayId:62554b24939b5f81ced234ba.gatewayName:Gateway 1 - Montagem,calculatedEnvironmentTemperature:24.266891343469013,timestampGateway:2023-04-27T16:07:46.000Z}','023-04-27T16:40:00.000Z,n
{fundamentalFrequency:35.2,status:1,operationTime:4096.166666666667,surfaceTemperature:37.146637944080474,velXThresholdWarning:5.625,velYThresholdWarning:5.625,velZThresholdWarning:5.625,velXThresholdCritical:8.875,velYThresholdCritical:8.875,velZThresholdCritical:8.875,surfaceTemperatureThresholdWarning:60,surfaceTemperatureThresholdCritical:75,lastTimestamp:Thu Apr 27 2023 16:40:00 GMT+0000 (Coordinated Universal Time),gatewayId:62554b24939b5f81ced234ba.gatewayName:Gateway 1 - Montagem,calculatedEnvironmentTemperature:24.21127321253933,timestampGateway:2023-04-27T16:17:54.000Z}','023-04-27T16:50:00.000Z,n
{fundamentalFrequency:35.24,status:1,operationTime:4096.3333333333333,surfaceTemperature:37.01895616666667,velXThresholdWarning:5.625,velYThresholdWarning:5.625,velZThresholdWarning:5.625,velXThresholdCritical:8.875,velYThresholdCritical:8.875,velZThresholdCritical:8.875,surfaceTemperatureThresholdWarning:60,surfaceTemperatureThresholdCritical:75,lastTimestamp:Thu Apr 27 2023 16:50:00 GMT+0000 (Coordinated Universal Time),gatewayId:62554b24939b5f81ced234ba.gatewayName:Gateway 1 - Montagem,calculatedEnvironmentTemperature:24.47170152275093,timestampGateway:2023-04-27T16:35:21.000Z}','023-04-27T17:00:00.000Z,n
{fundamentalFrequency:34.99,status:1,operationTime:4096.5,accelerationX:0.04435294117647059,accelerationY:0.04435294117647059,accelerationZ:0.04435294117647059,speed:1042.5,surfaceTemperature:37.70201695009666,velX:3.431372549019608,velY:3.156862745098039,velZ:2.058823529411765,velXThresholdWarning:5.625,velYThresholdWarning:5.625,velZThresholdWarning:5.625,velXThresholdCritical:8.875,velYThresholdCritical:8.875,velZThresholdCritical:8.875,surfaceTemperatureThresholdWarning:60,surfaceTemperatureThresholdCritical:75,lastTimestamp:Thu Apr 27 2023 17:00:00 GMT+0000 (Coordinated Universal Time),banding:0.2964190370985915,cluster:3,outlier:0,unbalance:0,misalignment:0,bearing:0,activeField:0,unknown:0,gatewayId:62554b24939b5f81ced234ba.gatewayName:Gateway 1 -

```

Figura 16 – Texto CSV por decodificar

Naturalmente o passo seguinte seria de introduzir o csv em excel mas por incompatibilidade de separadores (excel não aceitava os separadores disponíveis no módulo de Wnology) o próximo passo foi de decodificar texto usando um programa em Python. O projeto mesmo utilizando um JSON parser que decodifica o texto corrido obtido em pares atributo – valor no formato JSON o resultado não foi satisfatório devido a várias inconsistências e originando erros. Além disso o processo não garantia uma automatização nem acedia a dados históricos.

Foi explorado outro método para extrair dados da plataforma. Utilizando o device-state para guardar os dados transmitidos podemos criar um histórico paralelo ao MFM. Nesta página já existe a opção de exportar em csv os dados recebidos, a única desvantagem ser que ainda não foi possível obter os dados arquivados no MFM.

Automatização

A plataforma além de poder comunicar com bases de dados também possibilita na página de “integrations” o estabelecimento de protocolos como o de MQTT.

MQTT - *Message Queuing Telemetry Transport* - é um protocolo que permite a um *broker*, através de um sistema de publicação/subscrição, orientar e transmitir informação. Isto possibilita a integração dentro do mesmo ambiente integrar mais sensores além do WS e receber informações além do MFM, assim Wnology assemelha-se mais a um sistema

SCADA alternativo e dinâmico possibilitando não só a monitorização dos motores mas também tomar controlo de operações, isto pode ser ligar/desligar, forçar uma paragem de emergência, accionar qualquer outro tipo de funções que possam ser associadas a um transmissor e recetor de sinais.

Em Überall et al.^{xxviii} foi estudado um sistema automatizado utilizando esta tecnologia para melhorar a acessibilidade e versatibilidade de um sistema normalmente controlado por PLC's que requerem um nível técnico de conhecimento de programação que pode não estar acessível a pequenas e médias empresas.

As vantagens da implementação de sistemas que usam este meio de comunicação são o fato de ser leve e consume pouca bateria, isto permite o controlo sobre diversos dispositivos de monitorização ao mesmo tempo e obter, por consequência, uma melhor representação dos processos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DE SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES

Os dados recebidos pela plataforma permitem com facilidade executar um balanço sobre os ganhos a obter numa eventual substituição do motor facilitando a tomada de decisões. A análise feita consiste em retirar todos os pontos do gráfico para uma folha de Excel e através dos valores de carga calcular a sua eficiência de trabalho, para tal foi recorrido às folhas técnicas de cada motor que indicam pontos de operação e à curva de operação (imagem 17) retirada do site da WEG para cada motor. Com a eficiência atual calculada foi feito o mesmo procedimento com novos motores, quando havia opção de melhoria de classificação IE superior no catálogo da WEG foram utilizados dados das mesmas fontes e quando não seria possível fazer a substituição por um motor pré-existente foi feito cálculo com recurso a valores tabelados na norma IEC 60034 de motores IE até à classificação IE4. Estes valores são: eficiência a 100% carga e 75% carga.

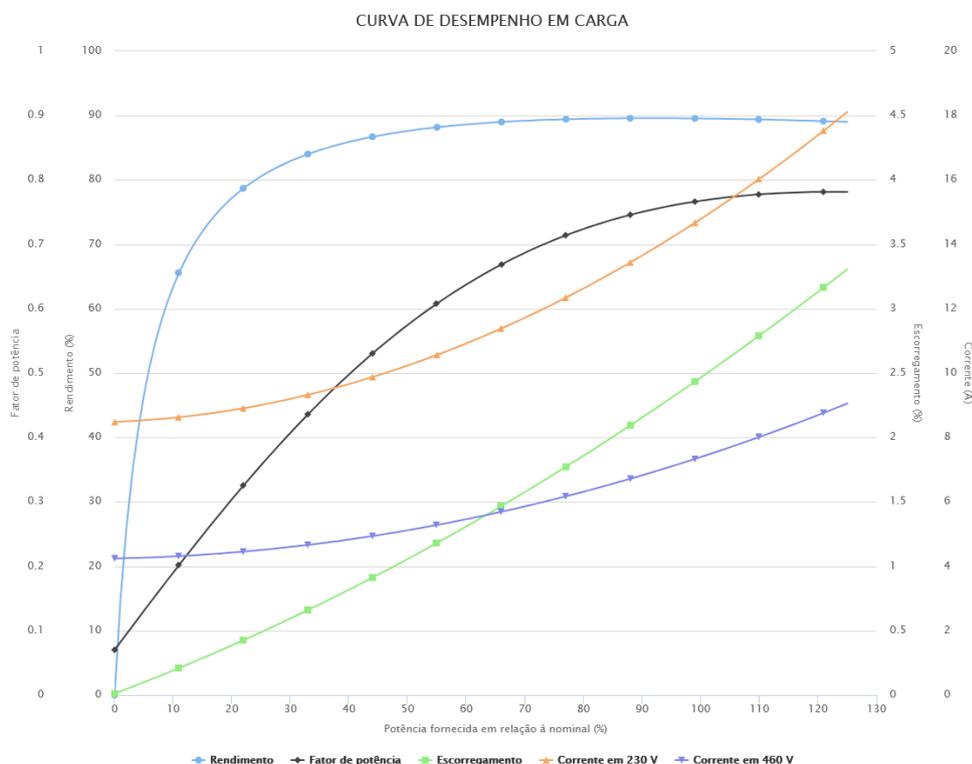


Figura 17 – curva de eficiência/carga do motor de 4kW / 2 pólos – fonte: <https://www.weg.net/catalog/weg/US/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Motores-de-Indu%C3%A7%C3%A3o---IEC/Usos-Geral/Carga%C3%A7a-de-Alum%C3%ADnio/Multimontagem-IE3-5-5-HP-4P-112M-3F-230-460-380-415-V-60-Hz-IC411---TEFC---B3L%28E%29/p/13983169>

Após a recolha destes recursos o cálculo da nova eficiência recorre a uma regressão logarítmica simples em excel utilizando 4 pontos das curvas de desempenho no site da WEG, no caso de motores já em produção. Para motores que não constam nos catálogos da WEG foi utilizado um método de cálculo descrito na norma IEC 60034-31 descrita na secção de erros mais abaixo.

A energia poupada devido à diferença de eficiências entre o motor original e um redimensionado e/ou de classificação IE superior foi obtida nos dois casos multiplicando pela potência de saída também obtida dos gráficos do MFM a diferença de eficiência e esses valores são posteriormente somados para obter o valor final de energia poupada durante esta semana. O cálculo do ROI é feita usando esta semana como padrão dividindo o valor de compra do motor pelo retorno anual de energia (em euros) em que todas as semanas desse ano seriam semelhantes à semana padrão.

Retirando dados históricos da semana de 16 a 24 de Janeiro de 2023 foi feita a análise aos motores já instalados com WS e subscrição *Specialist*. Por base na utilização e níveis de carga e também na frota já disponível de motores da WEG, foi averiguado quais alterações poderiam trazer benefício.

Em baixo estão descritas as análises aos motores de:

4.1.1. 2,2 kW

Correspondendo a peças integrais da máquina “Facejadora MASTED” os motores da bomba 2 e da unidade de corte possuem os seguintes gráficos, estes contém diversas linhas, o eixo “y” contém várias variáveis: Temperatura(°C), carga (%), potência de saída (kW), velocidade de rotação (rpm).

Bomba 2:

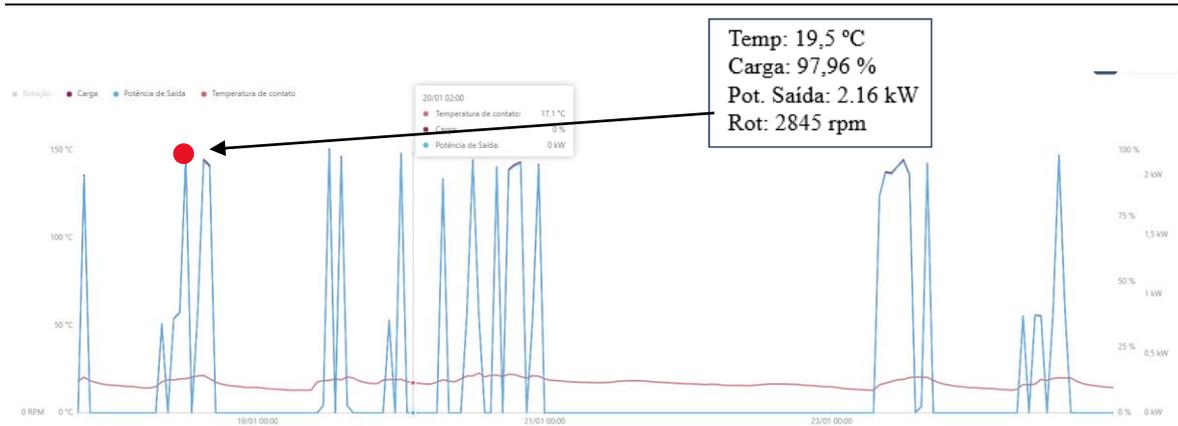


Figura 18 – Gráfico Carga/Temp/Pot-tempo da semana 16 a 24 de Janeiro para motor de bomba 2 da máquina MASTED

Com uma resolução de 1 hora, os dados extraídos declaram uma média de 1,984 kW correspondente a 99,21% de carga sobre o motor durante os períodos de trabalho nesta semana. Assim conclui-se que o motor está bem dimensionado, a única vantagem a ser obtida seria aumentar a classificação IE. Sendo os motores IE3, seria requerido um motor IE4, que a WEG não produz, assim permanece uma análise da hipotética substituição por um motor genérico IE 4 cujos valores de eficiência a $\frac{3}{4}$ de carga e 100% de carga são tabelados na norma IEC 60034(2021). Aqui obtemos bons resultados com poupanças de 0,498 kWh por semana no motor da Bomba 2 e 1,848 kWh por semana na unidade de corte, com um valor de produção estimado podemos obter um retorno ao investimento de ~81 e ~20 anos, respetivamente.

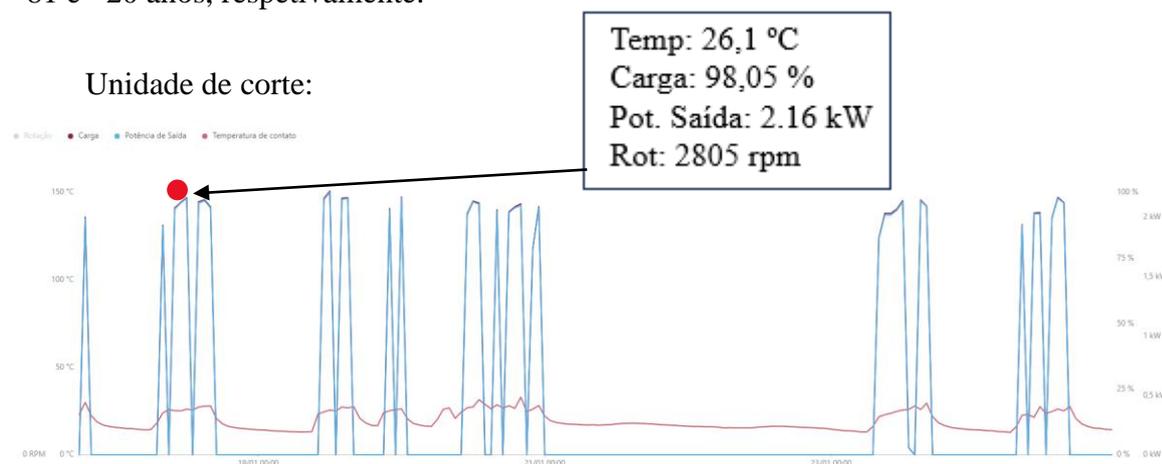


Figura 19 – Gráfico Carga/Temp/Pot-tempo da semana 16 a 24 de Janeiro para motor de unid. Corte MASTED

Num caso semelhante a média de carga de 2,211 kW correspondente a 110,6 % de carga sobre o motor sobre o qual ainda podemos afirmar que está bem dimensionado apesar da sobrecarga que o motor está desenhado para suportar durante curtos períodos.

4.1.2. 4kW

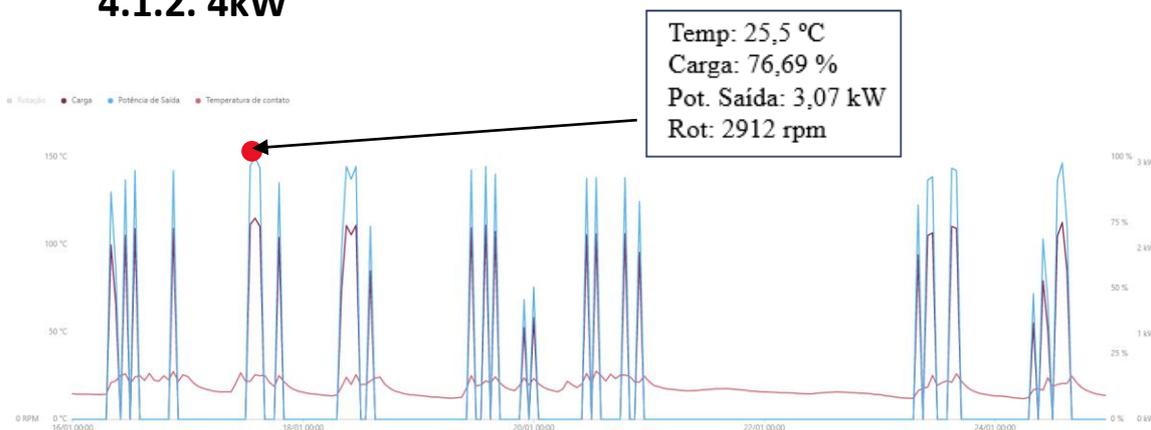


Figura 20 – Gráfico Carga/Temp/Pot-tempo da semana 16 a 24 de Janeiro para motor de unid. Óleo MASTED

Na unidade de óleo MASTED verifica-se que a potência de saída média correspondente a 2,81 kW apenas corresponde a 70,36% da potência disponível do motor. Apesar de perdas significativas de eficiência para motores de indução se verificarem principalmente quando a carga baixa de 50%, pôde ser analisado com relativa facilidade o redimensionamento para um motor de 3kW W22 alumínio IE3 400V 50Hz que é a gama com maior classificação de eficiência produzida pela WEG nesta categoria.

Os ganhos são de 2,68 kWh/semana, implicando um retorno ao investimento excessivo de mais de 14 anos.

4.1.3. 11kW

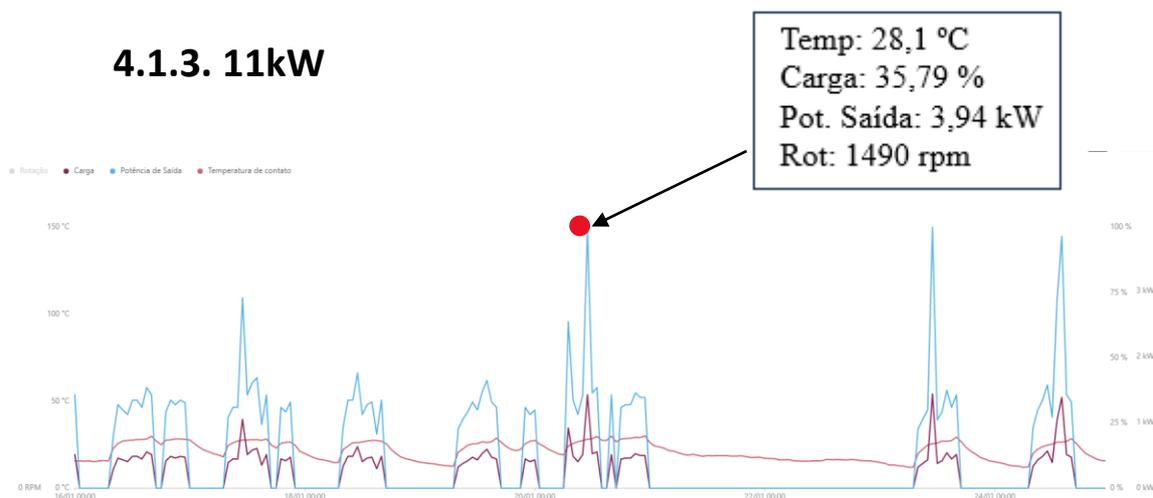


Figura 21 – Gráfico Carga/Temp/Pot-tempo da semana 16 a 24 de Janeiro para motor de da Unid. Hidráulica MASTED.

Durante a análise da unidade hidráulica MASTED é imediatamente óbvio a baixa utilização da potência disponível, a média da potência de saída 1,08 kW cerca de 10% de carga mas devido a picos de utilização subirem 3,29 kW a análise foi feita comparando os ganhos da substituição do motor de 11kW por um de 4kW IE 3.

Os ganhos excedem os 13kWh /semana, infelizmente isto não seria suficiente para justificar a substituição pois o período de retorno sobre o investimento seria cerca de 6 anos.

Foi ainda feita a análise para subir ao mais alto nível de eficiência - IE4, os dados recolhidos registam 80 horas semanais em trabalho, para tornar este projeto viável (ROI < 5 anos) seria necessário subir a carga horária da máquina para 21h/dia que equivale a um aumento de 131,25% para um ROI de 4,8 anos sendo isto uma estimativa visto que não se encontra na frota da WEG nenhum motor 4kW IE4 a venda.

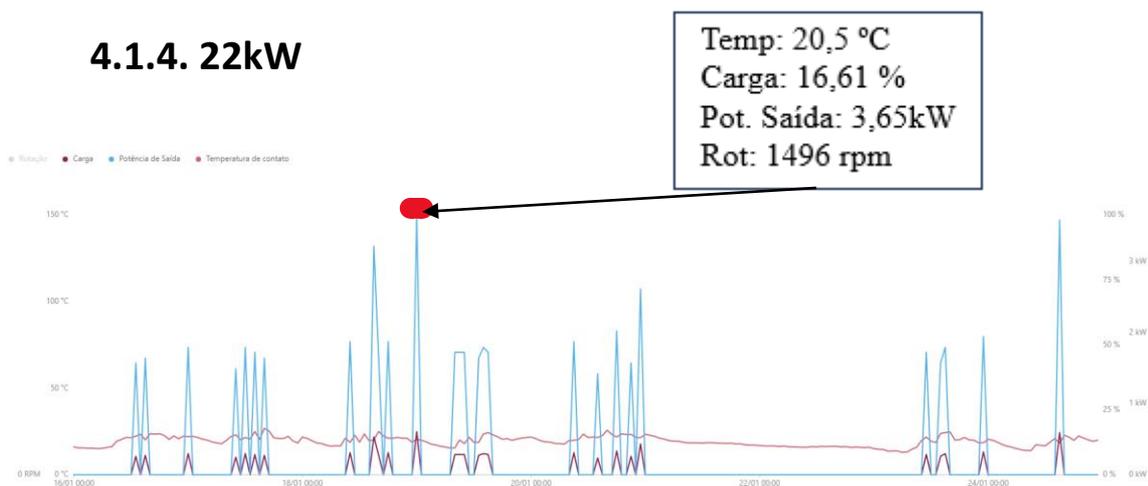


Figura 22 – Gráfico Carga/Temp/Pot-tempo da semana 16 a 24 de Janeiro para motor de prensa de introdução de estatores.

A média da potência de saída e máxima são, respetivamente 1,72kW e 3,65kW (7,81% e 16,6%), assim sabemos que podemos reduzir a potência disponível para 4kW. No entanto devido a eficiência superior de motores de maiores dimensões os ganhos são menores que o expectado, 4,511 kWh/semana. Uma análise semelhante à anterior foi efetuada para uma substituição ao mais alto nível de eficiência, IE4 e para um retorno ao investimento num motor de 22kW IE4 cujo o custo é apenas estimado pelo custo do atual motor 22kW, o ROI é de 4,7 anos. Este valor apenas é atingido se for assumido que o

motor trabalha as 24 horas do dia correspondendo a um aumento da carga semanal de 328%.

4.2. Erro

A análise descrita em cima apesar de possuir dados reais dos motores apenas deve ser interpretada como estimativa. Como explicado anteriormente a análise energética do MFM é executada pelo AI *Specialist* e trata-se apenas de uma aproximação com um erro que pode ir até os 10%.

Além deste facto, para obter as eficiências a cada dado ponto de carga foram utilizadas regressões lineares para simular as linhas de eficiência de cada motor recorrendo entre dois a cinco pontos recolhidos das fichas técnicas^{xxix} dos mesmos incorrendo em erros que variam desde 0,21% a 9,44%.

Ainda foi empregada para obtenção das eficiências nos pontos de operação (particularmente no caso do torno WEG e nos motores de 2kW) a formula enunciada na norma IEC 60034-31 :

$$\eta_p = \frac{100}{1 + \frac{v_0}{p} + v_l * p} \quad (1)$$

Com:

$$v_l = \frac{\left(\frac{100}{\eta_{100}} - 1\right) - 0,75 * \left(\frac{100}{\eta_{75}} - 1\right)}{0,4375} \quad (2)$$

E:

$$v_0 = \left(\frac{100}{\eta_{100}} - 1\right) - v_l \quad (3)$$

Em que η_p é a eficiência a obter, p é a carga relativa a que o motor trabalha, v_l e v_0 são resultados intermédios e η_{100} e η_{75} são os valores de eficiência a 100% e 75% carga respetivamente. Esta metodologia, no entanto, não é aconselhável quando a carga baixa

dos 50% pois incorre em erros significativos e, embora pontualmente, durante o cálculo em *excel* este evento ocorreu.

4.3. Regressão Multi-linear

O passo seguinte na obtenção duma linha-base energética seria utilizar estes dados mais os dados obtidos da produção via a ligação WSFM para identificar a relevância de certos fatores para o consumo e através deles prever com o máximo de precisão o consumo total da fábrica para que fatores controláveis pudessem ser identificados como pontos de melhoria num nível energético. Isto seria executado com recurso a *machine learning* e um algoritmo de regressão multi-linear. Com falta de dados reais foi feita uma prova de conceito em que foi utilizado uma folha de dados genéricos muito utilizada em machine learning - the California housing dataset – e uma biblioteca também muito usada para os mesmos efeitos: *skitiLearn*.

O programa transforma a folha de dados em csv para o formato de uma matriz. Dentro da matriz foi usado como exemplo de objetivo de cálculo os valores da coluna “medium_income” e usados como inputs apenas as colunas que tivessem correlação minimament significativa com esses valores. Para identificar a correlação de cada coluna com a coluna de “medium_income” que será a diante referida como “y” foi usada a função “corr” que leva como input a *data frame* total e a coluna “y”.

Finalmente com os dados de maior influência identificados utilizamos uma matriz dos seus valores (“x_train”) para “treinar” a nossa fitness function que irá formar uma previsão dos valores de “y” (“y_train”). Para tal ainda é necessário fornecer ainda um vetor de “y” para servir como feedback e completar o treino da função.

Após estes passos podemos pedir à consola para imprimir as previsões de “y” e podemos também calcular posteriormente o erro para avaliar se é válido o modelo.

O programa foi corrido em Python na plataforma Jupyter e está ilustrado nas figuras 23, 24 e 25.

```

AttributeError: 'DataFrame' object has no attribute 'DataFrame'

[5]: import pandas as pd
import numpy as np

df = pd.read_csv('C:/Users/User/Desktop/TESE/Regressão linear Multipla/MachineLearning/housing.csv')
del df['ocean_proximity']
df

[5]:

```

	longitude	latitude	housing_median_age	total_rooms	total_bedrooms	population	households	median_income	median_house_value
0	-122.23	37.88	41.0	880.0	129.0	322.0	126.0	8.3252	452600.0
1	-122.22	37.86	21.0	7099.0	1106.0	2401.0	1138.0	8.3014	358500.0
2	-122.24	37.85	52.0	1467.0	190.0	496.0	177.0	7.2574	352100.0
3	-122.25	37.85	52.0	1274.0	235.0	558.0	219.0	5.6431	341300.0
4	-122.25	37.85	52.0	1627.0	280.0	565.0	259.0	3.8462	342200.0
...
20635	-121.09	39.48	25.0	1665.0	374.0	845.0	330.0	1.5603	78100.0
20636	-121.21	39.49	18.0	697.0	150.0	356.0	114.0	2.5568	77100.0
20637	-121.22	39.43	17.0	2254.0	485.0	1007.0	433.0	1.7000	92300.0
20638	-121.32	39.43	18.0	1860.0	409.0	741.0	349.0	1.8672	84700.0
20639	-121.24	39.37	16.0	2785.0	616.0	1387.0	530.0	2.3886	89400.0

20640 rows x 9 columns

Figura 23 - Algoritmo de Regressão Multi-Linear parte 1

```

[6]: import pandas as pd
import numpy as np

df = pd.read_csv('C:/Users/User/Desktop/TESE/Regressão linear Multipla/MachineLearning/housing.csv')
del df['ocean_proximity']
df.corr()['median_income']

[6]:
longitude      -0.015176
latitude       -0.079809
housing_median_age -0.119034
total_rooms     0.198050
total_bedrooms -0.007723
population      0.004834
households      0.013933
median_income   1.000000
median_house_value 0.688075
Name: median_income, dtype: float64

[7]: import pandas as pd
import numpy as np

df = pd.read_csv('C:/Users/User/Desktop/TESE/Regressão linear Multipla/MachineLearning/housing.csv')
del df['ocean_proximity']
del df['longitude']
del df['households']
del df['total_bedrooms']
del df['latitude']
del df['population']

```

Figura 24 - Algoritmo de Regressão Multi-Linear parte 2

```

[12]: import pandas as pd
import numpy as np

df = pd.read_csv('C:/Users/User/Desktop/TESE/Regressão linear Multipla/MachineLearning/housing.csv')
income = df['median_income']
df = df.drop(['ocean_proximity', 'longitude', 'latitude', 'households', 'total_bedrooms', 'population', 'median_income'], axis= 1)
df['median_income'] = income
df_np = df.to_numpy()

df_np.shape

[12]: (20640, 4)

[13]: df_np

[13]: array([[4.1000e+01, 8.8000e+02, 4.5260e+05, 8.3252e+00],
 [2.1000e+01, 7.0990e+03, 3.5850e+05, 8.3014e+00],
 [5.2000e+01, 1.4670e+03, 3.5210e+05, 7.2574e+00],
 ...,
 [1.7000e+01, 2.2540e+03, 9.2300e+04, 1.7000e+00],
 [1.8000e+01, 1.8500e+03, 8.4700e+04, 1.8672e+00],
 [1.6000e+01, 2.7850e+03, 8.9400e+04, 2.3886e+00]])

[15]: X_train, y_train = df_np[:, :3], df_np[:, -1]
from sklearn.linear_model import LinearRegression
sklearn_model = LinearRegression().fit(X_train, y_train)
sklearn_y_predictions = sklearn_model.predict(X_train)
sklearn_y_predictions

[15]: array([[6.31571878, 5.98153894, 4.87756985, ..., 2.84864376, 2.72835789,
 2.86031825]])

```

Figura 25 – Algoritmo de Regressão Multi-Linear parte 3

4.4. Planeamento de expansão

A WEGEURO encontra-se numa fase de transição, as suas instalações na zona industrial da Maia serão transferidas para a fábrica 2 de Santo Tirso assim que esta esteja pronta para as receber. O plano de expansão de sensores e supervisionamento energético estende-se às máquinas da Maia e novos que venham popular a nova fábrica.

4.4.1. Intervenientes energéticos relevantes

No plano de ações da norma ISO 50001 é recomendado a identificação dos SEU's (*Significant Energy Users*) que correspondem às máquinas de maior consumo. Esta análise foi feita dentro da fábrica da Maia e nela se baseia a escolha das máquinas a monitorar. Devido ao facto de as instalações serem futuramente transferidas para a fábrica 2 de Santo Tirso, as máquinas da Maia podem ser já marcadas para monitorização.

Pelos consumos registados é imperativo controlar aqueles consumidores com mais impacto, dentro dos quais foram assinalados as máquinas que possuem motores elétricos como força motriz, assim foi obtida a tabela 2:

Tabela 2 – máquinas disponíveis para expansão da sensorização de motores.

Máquina	Fábrica	Prioridade	Consumo (mês) [kWh]
Torno carcaças VTC	Maia	1 ^a	9 900
Ranhuradora Schuller N20	Maia	1 ^a	8 448
Ranhuradora Schuller N8	Maia	1 ^a	6 336
Retificadora Danobat	Maia	1 ^a	7 304
Torno Veios Hynumat	Maia	1 ^a	6 600
PRENSA 1^a OP ARISA	Maia	1 ^a	5 544
Torno veios Puma	Maia	1 ^a	4 884

Torno veios Guruptze	Maia	1 ^a	3 960
Laboratório 1	Maia	1 ^a	25 000
Laboratório 2	Maia	1 ^a	50 000
Decapagem	Santo Tirso	2 ^a	--

5. CONCLUSÕES

Os processos descritos durante a produção da WEGEURO registam uma baixa automatização, nos processos passíveis de serem caracterizados por recurso ao WS por uma perspectiva energética são relativamente rápidos e isto interfere com a habilidade do sistema implementado pela WEG de ser preciso nas estimativas que providencia. A menor amostragem feita por parte do sensor é de 10 em 10 minutos, a menor amostragem por parte do Specialist é de 60 minutos e torna redutora a análise feita aos processos e impede que sejam retiradas muitas conclusões sobre o tempo de operação e possíveis influências no consumo. Este sistema representa o primeiro passo, a par de sistemas como o SCADA em ter plena consciência dos processos, gastos e ganhos, de um ponto de vista energético. No entanto, a integração no quotidiano e em smart grids ainda se encontra um pouco aquém.

6. TRABALHOS FUTUROS

A linha-base tem por objetivo caracterizar os processos que ocorrem dentro da fábrica de uma forma simplificada, para obter informações sobre condições atuais é necessário que o valor desta linha seja dinâmico, como não foi possível implementar o algoritmo de previsão ao problema em questão é do interesse de trabalhos futuros de recolher os dados de consumo nos últimos meses e integrar a correlação dos mesmos

dentro do algoritmo para que a linha-base represente a forma como energia está a ser consumida atualmente e potencialmente o futuramente também.

Com a inauguração da nova fábrica da WEGEURO vem também um novo sistema de painéis fotovoltaicos, resultado de uma consultoria com a EDP. É, portanto, do interesse de trabalhos futuros em conta com as habilidades da plataforma acima descrita de explorar a integração de sistemas de supervisão para assegurar o *output* máximo possível a cada altura do ano da planta fotovoltaica utilizando as capacidades de angariação e transmissão de dados do programa. MPPT e antecipação/observação de falhas para tirar o máximo dos recursos é já possível através de alguns sistemas SCADA^{xxx}, portanto, seria necessário confirmar e explorar a integração desses dados na plataforma Wnology.

O algoritmo utilizado neste trabalho recorre a uma simples regressão linear, é notado que os resultados obtidos apenas servem como prova de conceito e melhorias teriam de ser aplicadas. A ser explorado fica a possibilidade de um novo algoritmo de machine learning que consiga minimizar o erro e incluir informações sobre os motores em produção para melhor identificação dos trabalhos energeticamente e permitir um mapeamento dos mesmos de modo a obter reduções de custo pela manipulação dos horários para evitar picos de consumo energético e reduzir o preço de compra à rede.

Futuramente este sistema deverá ser substituído por uma *Smart grids*^{xxxii}. Uma *smart grid* controla vários Recursos Energéticos Distribuídos (RED's) e gere as necessidades e picos de produção de várias micro-grids através de sistemas de armazenamento energético (SAE's) e sistemas de controlo centralizados. Aqui nasce o novo conceito de Virtual Power Plant (VPP) e Demand-Side Management (DSM)^{xxxiii}.

Uma VPP^{xxxiii} opera um nível acima de uma *smart grid* e além de gerir os RED's que são constituídos por produções, de pequena-média escala de energia renovável que está sujeita a picos de produção em função do clima e portanto requer uma gestão inteligente utilizando SAE's para retirar o máximo da produção e reduzir picos de compra à rede, normalizando o consumo e reduzindo o preço de compra à rede. Este trabalho é executado pela VPP que ao gerir e prever as necessidades energéticas com referência a dados fornecidos pelas *smart grids*, IoT e inteligência artificial procura comprar energia a valores mais baixos quando há baixa procura e reduzir ou até vender de volta à rede quando a procura for mais alta e o preço mais baixo. Assim, podemos otimizar o

consumo, reduzir a pressão sobre as fábricas de produção elétrica e reduzir a pegada de carbono. Para caminhar no sentido de tornar isto uma realidade deve ser elaborado o sistema de controlo energético e a implementação em Wnology o cálculo com recurso a machine learning da linha-base energética, deve também ser desenhado um controlador para gerir a produção e consumo de energia e explorada a exequibilidade e os ganhos de migrar processos para horas de baixa carga na rede. É no interesse de trabalhos futuros que a exequibilidade desta automatização deverá ser avaliada assim como os benefícios económicos e sociais estimados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ⁱ Paul K Geo et al., «IoT in Monitoring and Improving Manufacturing Process in Manufacturing Industry», em *2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)* (2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), Coimbatore, India: IEEE, 2022), 441–44, <https://doi.org/10.1109/ICIRCA54612.2022.9985556>.
- ⁱⁱ M. Borghetti et al., «Printed Sensors for Smart Objects in Industry 4.0», em *6th International Forum on Research and Technology for Society and Industry, RTSI 2021 - Proceedings*, 2021, 57–62, <https://doi.org/10.1109/RTSI50628.2021.9597209>.
- ⁱⁱⁱ E M Ciortea, «Cloud Manufacturing - the Connection between RAMI 4.0 and IoT», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 916, n.º 1 (1 de setembro de 2020): 012019, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/916/1/012019>.
- ^{iv} X. Chen et al., «Energy Consumption Reduction and Sustainable Development for Oil & Gas Transport and Storage Engineering», *Energies* 16, n.º 4 (2023), <https://doi.org/10.3390/en16041775>; X. Zhu e W. Fuli, «Energy savings bottleneck diagnosis and optimization decision method for industrial auxiliary system based on energy efficiency gap analysis», *Energy* 263 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126119>; R. Leone et al., «Recycling Mussel Shells as Secondary Sources in Green Construction Materials: A Preliminary Assessment», *Sustainability (Switzerland)* 15, n.º 4 (2023), <https://doi.org/10.3390/su15043547>.
- ^v R.M. Johannsen et al., «Exploring pathways to 100% renewable energy in European industry», *Energy* 268 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126687>; Dmitry Rozhitsky et al., «Energy Intensity and Energy Efficiency of Energy Saving Policy of Railway Transport», *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_35; Nofirman Firdaus, Hasnida Ab-Samat, e Bambang Teguh Prasetyo, «Maintenance strategies and energy efficiency: a review», *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2023, <https://doi.org/10.1108/JQME-06-2021-0046>.
- ^{vi} Norma Brasileira ISO 50001 (2018), «Sistemas de gestão da energia - Requisitos com orientações para o uso.».
- ^{vii} Giuseppe Marco Tina, Fabio Cosentino, e Cristina Ventura, «Monitoring and Diagnostics of Photovoltaic Power Plants», em *Renewable Energy in the Service of Mankind Vol II*, ed. Ali Sayigh (Cham: Springer International Publishing, 2016), 505–16, https://doi.org/10.1007/978-3-319-18215-5_45.
- ^{viii} N.N. Goma, K.Y. Youssef, e M. Abouelatta, «An IoT-based energy efficient system for industrial sector», em *ICENCO 2019 - 2019 15th International Computer Engineering Conference: Utilizing Machine Intelligence for a Better World*, 2019, 132–37, <https://doi.org/10.1109/ICENCO48310.2019.9027440>.
- ^{ix} S. Dhanalakshmi, M. Poongothai, e K. Sharma, «IoT Based Indoor Air Quality and Smart Energy Management for HVAC System», em *Procedia Computer Science*, vol. 171, 2020, 1800–1809, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.193>.
- ^x D.-M. Yao et al., «An energy efficiency evaluation method based on energy baseline for chemical industry», *Mathematical Problems in Engineering* 2016 (2016), <https://doi.org/10.1155/2016/7087393>.
- ^{xi} N. Liu, Y.F. Zhang, e W.F. Lu, «A Hybrid Approach to Energy Consumption Modelling Based on Cutting Power: A Milling Case», *Journal of Cleaner Production* 104 (outubro de 2015): 264–72, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.049>.
- ^{xii} Documentação Wnology - <https://docs.app.wnology.io/workflows/overview/>.
- ^{xiii} Adão Pinto, «Aplicação da plataforma Wnology da WEG no desenvolvimento de projeto de implementação de um Digital Twin em máquina crítica.»
- ^{xiv} Mateus Nicoladelli de Oliveira e Ademir Nied, «CREATING AN ALGORITHM TO IDENTIFY PATTERNS FROM POWER GENERATION ASSET & IIOT SOLUTIONS», sem data.
- ^{xv} M.M. Islam et al., «Internet of Things: Device Capabilities, Architectures, Protocols, and Smart Applications in Healthcare Domain», *IEEE Internet of Things Journal* 10, n.º 4 (2023): 3611–41, <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3228795>.
- ^{xvi} A. Alqoud, D. Schaefer, e J. Milisavljevic-Syed, «Industry 4.0: A Review of Digital Retrofitting Solutions for Legacy Manufacturing Systems», em *Advances in Transdisciplinary Engineering*, vol. 25, 2022, 3–9, <https://doi.org/10.3233/ATDE220557>.
- ^{xvii} O. Chenaru et al., «Enhancing Antifragile Performance of Manufacturing Systems through Predictive Maintenance», *Applied Sciences (Switzerland)* 12, n.º 23 (2022), <https://doi.org/10.3390/app122311958>.

- ^{xviii} Yuehua Liu et al., «Empowering IoT Predictive Maintenance Solutions With AI: A Distributed System for Manufacturing Plant-Wide Monitoring», *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 18, n.º 2 (fevereiro de 2022): 1345–54, <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3091774>.
- ^{xix} B. Raut Nitin e N.M. Dhanya, «Green Internet of Things (IoT) with dynamic sleep wake-up approach for constrained things», *Measurement: Sensors* 25 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100656>.
- ^{xx} «_.pdf», sem data.
- ^{xxi} Ian Graham et al., «Performance Measurement and KPIs for Remanufacturing», *Journal of Remanufacturing* 5, n.º 1 (dezembro de 2015): 10, <https://doi.org/10.1186/s13243-015-0019-2>.
- ^{xxii} S. Kasturi e B.A. Kannappan, «A methodological framework to benchmark and monitor energy performance in textile wet processing small and medium enterprises: Proposal and evaluation», *Energy for Sustainable Development* 71 (2022): 585–99, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.11.001>.
- ^{xxiii} G.E. Valencia et al., «Energy saving in industrial process based on the equivalent production method to calculate energy performance indicators», *Chemical Engineering Transactions* 57 (2017): 709–14, <https://doi.org/10.3303/CET1757119>.
- ^{xxiv} V.A.A. Abraham et al., «Identification of savings opportunities in a steel manufacturing industry», *International Journal of Energy Economics and Policy* 11, n.º 4 (2021): 43–50, <https://doi.org/10.32479/ijeep.11142>.
- ^{xxv} R.P. Castrillon, A.J. González, e E.C. Quispe, «Energy efficiency improvement in the cement industry by wet process through integral energy management system implementation [Mejoramiento de la eficiencia energética en la industria del cemento por proceso húmedo a través de la implementación del sistema de gestión integral de la energía]», *DYNA (Colombia)* 80, n.º 177 (2013): 115–23.
- ^{xxvi} IEC TS 60034-31 (2021), «Rotating electric machines - part 31: selection of energy-efficient motors including variable speed applications - Application Guidelines».
- ^{xxvii} Manual MFM - <https://mfm.wnology.io/page/guide?guide=mfm>.
- ^{xxviii} Christian Uberall, Marcel Bartholet, e Roman Khudaybergenov, «Smart & Automated Production Based on MQTT», em *2021 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets)* (2021 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets), Glasgow, United Kingdom: IEEE, 2021), 1–6, <https://doi.org/10.1109/SmartNets50376.2021.9555408>.
- ^{xxix} https://www.weg.net/catalog/weg/US/en/Electric-Motors/AC-Motors---IEC/c/US_MT_IEC-23/04/23.
- ^{xxx} Zheng et al., «Advanced Optimizer for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Systems in Smart Grid».
- ^{xxxi} M.A. Judge et al., «Overview of smart grid implementation: Frameworks, impact, performance and challenges», *Journal of Energy Storage* 49 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104056>.
- ^{xxxii} S. Mohanty et al., «A Genetic Algorithm-Based Demand Side Management Program for Implementation of Virtual Power Plant Integrating Distributed Energy Resources», *Lecture Notes in Electrical Engineering* 814 (2022): 469–81, https://doi.org/10.1007/978-981-16-7076-3_41.
- ^{xxxiii} J.F. Venegas-Zarama e J.I. Muñoz-Hernández, «A General Description of Virtual Power Plants as Smart Manager in Power Systems», em *2022 IEEE European Technology and Engineering Management Summit, E-TEMS 2022 - Conference Proceedings, 2022*, 83–87, <https://doi.org/10.1109/E-TEMS53558.2022.9944540>; S. Panda et al., «A conceptual review on transformation of micro-grid to virtual power plant: Issues, modeling, solutions, and future prospects», *International Journal of Energy Research* 46, n.º 6 (2022): 7021–54, <https://doi.org/10.1002/er.7671>.