

ALBERTO ALBISSU DE PAULA SANTOS

**Plano de Manutenção Utilizando *Lean Manufacturing* para uma Turbina
Eólica Vertical**

Guaratinguetá

2024

ALBERTO ALBISSU DE PAULA SANTOS

**Plano de Manutenção Utilizando *Lean Manufacturing* para uma Turbina
Eólica Vertical**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Faculdade de
Engenharia e Ciências, Guaratinguetá,
para obtenção do título de Grau acadêmico
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Prof. Dr. Antonio Dos
Reis De Faria Neto

Guaratinguetá

2024

Santos, Alberto Albissú de Paula

S237p

Plano de manutenção utilizando *Lean Manufacturing* para uma turbina eólica vertical / Alberto Albissú de Paula Santos - Guaratinguetá, 2024.

45 f : il. Bibliografia:
f. 43-45

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica –
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia
e Ciências de Guaratinguetá, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Antonio dos Reis de Faria Neto

1. Turbinas eólicas. 2. Manutenção produtiva total.
3. Produção enxuta. 4. Energia - Fontes alternativas.
I. Título.

CDU 658.581

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto deste trabalho reside na proposição de um plano de manutenção que pode ser aplicado em diferentes contextos de utilização das turbinas eólicas verticais, que são bastante indicadas para instalação em centros urbanos. Com o uso do plano, é possível atingir uma maior eficiência na produção de energia elétrica, contribuindo, conseqüentemente, para a substituição da matriz energética global e para o desaceleramento do processo de aquecimento global.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The impact of this work lies in the proposition of a maintenance plan that can be applied in different contexts of use for vertical wind turbines, which are highly recommended for installation in urban centers. By using the plan, it is possible to achieve greater efficiency in electricity production, thus contributing to the replacement of the global energy matrix and to the slowing down of global warming.

ALBERTO ALBISSU DE PAULA SANTOS

**Plano de Manutenção Utilizando *Lean Manufacturing* para uma Turbina
E61ica Vertical**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratingueta, para obtenção do Título de Grau acadêmico Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data da defesa: 18/11/2024

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Antonio dos Reis de Faria Neto
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratingueta



Prof. Dr. Erica Ximenes Dias
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratingueta



Prof. Dr. Tássio Santos Castro
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratingueta

Dedico este trabalho a todos que
contribuíram para a minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os docentes que contribuíram para a minha formação ao longo da trajetória acadêmica.

Gostaria de enfatizar o agradecimento a todos que participaram, direta ou indiretamente, para cada etapa da minha jornada até aqui.

“A ciência é sobre saber, a engenharia é sobre fazer”

(Henry Petroski)

RESUMO

Este trabalho propõe um plano de manutenção baseado nos princípios do *Lean Manufacturing* para turbinas eólicas verticais, com foco em aumentar a eficiência e a longevidade dos equipamentos em ambientes urbanos. As turbinas eólicas verticais apresentam vantagens, como menor ruído e menor dependência da direção dos ventos, tornando-se as mais recomendadas para centros urbanos. O plano de manutenção visa reduzir custos operacionais e aprimorar a disponibilidade dos equipamentos, contribuindo para a substituição gradual de fontes de energia não renováveis. Ao promover uma abordagem sustentável e eficiente, o estudo colabora no enfrentamento do aquecimento global e fortalece a geração de energia limpa. A implementação do plano é pensada para ser adaptável a diferentes modelos de turbinas, proporcionando flexibilidade e aplicabilidade em diversos contextos. O trabalho também analisa os impactos da aplicação do *Lean Manufacturing* na manutenção, mostrando como a redução de desperdícios pode ser um diferencial estratégico para o setor energético.

Palavras-chave: turbinas eólicas verticais; *Lean Manufacturing*; manutenção; energia renovável; sustentabilidade.

ABSTRACT

This study proposes a maintenance plan based on the principles of Lean Manufacturing for vertical wind turbines, focusing on increasing the efficiency and longevity of equipment in urban environments. Vertical wind turbines offer advantages such as lower noise and reduced dependence on wind direction, making them the most recommended choice for urban centers. The maintenance plan aims to reduce operational costs and enhance equipment availability, contributing to the gradual replacement of non-renewable energy sources. By promoting a sustainable and efficient approach, the study helps address global warming and strengthens the generation of clean energy. The implementation of the plan is designed to be adaptable to different turbine models, providing flexibility and applicability in various contexts. The work also analyzes the impacts of applying Lean Manufacturing to maintenance, showing how waste reduction can be a strategic differentiator for the energy sector.

Keywords: vertical wind turbines; Lean Manufacturing; maintenance; renewable energy; sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVO.....	11
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	11
1.3 JUSTIFICATIVA.....	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1 ENERGIA EÓLICA.....	13
2.2 VENTO: CONCEITOS BÁSICOS.....	15
2.3 BREVE HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA.....	16
1.1 PRINCIPAIS COMPONENTES DE TURBINAS EÓLICAS.....	18
1.2 TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS.....	20
1.3 PRINCIPAIS CONCEITOS DO <i>LEAN</i> MANUFACTURING.....	24
1.4 PRINCIPAIS FERRAMENTAS DO <i>LEAN</i> MANUFACTURING.....	28
2 LEAN MANUFACTURING E A MANUTENÇÃO.....	32
3 METODOLOGIA DE UMA PROPOSTA DE PLANO DE MANUTENÇÃO À TURBINA EÓLICA VERTICAL.....	35
4 CONCLUSÃO.....	42
5 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	43
REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de opções alternativas para a geração de energia elétrica é um desafio cada vez mais prioritário na luta contra o aquecimento global. Uma das principais e mais viáveis soluções encontradas é a utilização da energia eólica.

"A energia renovável é o único caminho confiável para o mundo evitar uma catástrofe climática" (GUTERRES, 2023).

Entre as tecnologias desenvolvidas para essa área, as turbinas eólicas verticais têm se tornado mais atrativas, especialmente em centros urbanos, devido à necessidade menor de espaço para instalação, à diminuição de ruído e à redução da dependência da direção dos ventos em comparação às turbinas horizontais.

Dentro desse contexto, a manutenção das turbinas eólicas verticais é um fator crucial para garantir um bom custo-benefício durante a instalação e utilização. Em conformidade a Neves (2018), uma das principais abordagens para isso é o *Lean Manufacturing*, que visa garantir o maior tempo de utilização possível do equipamento através de uma série de práticas e atividades.

1.1 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é elaborar um plano de manutenção para turbinas eólicas verticais utilizando os princípios do *Lean Manufacturing*, aplicável em diferentes ambientes e contextos de uso, principalmente em áreas bastante urbanizadas. A proposta consiste em alinhar a utilização da energia eólica, que é renovável e se faz cada vez mais necessária com a otimização proposta pela aplicação das noções de *Lean*.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Este estudo reside na proposta de um plano de manutenção que possa ser executado e acompanhado em diferentes locais, oferecendo uma nova abordagem para sistemas de gestão de manutenção e áreas correlatas. Isso é especialmente relevante no contexto industrial atual, que exige processos cada vez mais enxutos e com conceitos de melhoria contínua e ativa.

Com a utilização do Plano de Manutenção e controle propostos busca-se a melhora na operação da a turbina eólica vertical. Possibilitando operar de forma consistente, otimizada e contínua ao longo da sua vida útil esperada - por volta de 30 anos. Os planos buscam o encontro pela melhoria contínua das operações.

1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho se justifica pela viabilidade das turbinas eólicas verticais como alternativa de geração de energia elétrica em comparação às usinas termoeletricas, alinhando-se com a busca por inovações e tecnologias no setor. Ademais, com a utilização desse tipo de turbina faz-se necessário propostas de alternativas de manutenção para aperfeiçoar todos os processos que cercam e podem prolongar a vida útil das turbinas eólicas. Assim, o plano de manutenção é relevante para o andamento das tarefas – desde o nível básico até o mais complexo. Diante do uso do plano é verificável observar o progresso e o prosseguimento em todas as etapas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo demonstra os referenciais teóricos relativos à energia eólica. Também fundamenta conceitualmente o vento, os componentes das turbinas eólicas, os principais conceitos e ferramentas de *Lean Manufacturing*.

Coloca-se em perspectiva o fato da necessidade de uma energia renovável, conforme afirma Guterres (2023). Dessa maneira, é fundamental compreender os princípios da força motriz – o vento. Bem como é importante considerar o funcionamento das turbinas eólicas e os conceitos e aplicações de *Lean Manufacturing*. Segundo Neves (2018), a aplicação do *Lean* – que visa otimizar todo processo produtivo – deve ser feita por mudança cultural que inclui todos os colaboradores organização, preferencialmente deve-se iniciar pela gestão de topo.

Deste modo, é possível observar os referenciais teóricos na busca para alinhar a procura por energia renovável e a implementação dos conceitos de *Lean*.

2.1 ENERGIA EÓLICA

Conforme Martins, Guarnieri e Pereira (2008), ao longo da história, a energia eólica foi uma importante fonte de geração de energia, força motriz e calor; porém, a partir das inovações e exigências que passaram a surgir após a Revolução Industrial, no século XIX, foi necessário implementar novas alternativas de geração de energia para atender às novas demandas, como carvão, gás natural, energia nuclear e outras.

Durante o século XX, foram iniciados inúmeros estudos e acompanhamentos dos impactos ambientais devido ao uso das fontes de energia, muitas vezes, sem considerar as consequências para todo o ecossistema. Logo, iniciou-se a busca por fontes que sejam limpas e renováveis. Nesse contexto, a energia eólica voltou a ter mais destaque, pois, com avanços tecnológicos, consegue atender a uma maior demanda sem a liberação de gases nocivos, além de o vento ser uma fonte inesgotável.

“A energia eólica é produzida a partir da força dos ventos – é abundante, renovável, limpa e disponível em muitos lugares. Essa energia é gerada por meio de aerogeradores, nos quais a força do vento é captada por hélices ligadas a uma turbina que aciona um gerador elétrico. A quantidade de energia transferida é função da densidade do ar, da área coberta pela rotação das pás (hélices) e da velocidade do vento.” (NASCIMENTO; ARRUDA, 2021, p. 3)

Turbinas eólicas operam com base no princípio de transformar energia eólica em energia elétrica. Para maximizar a eficiência desse processo, é crucial escolher o local adequado para a instalação das turbinas, pois a localização fornece informações como a velocidade do vento, sua duração, o tipo de vento, entre outros dados complementares. A expectativa é que a energia cinética gerada pelos ventos seja exponencialmente proporcional à sua velocidade, ou seja, um aumento na velocidade dos ventos resulta em uma maior geração de energia.

Segundo Purificação e Della Fonte (2012), o custo de capital – relacionado ao investimento total e às condições de pagamento –, o custo de combustível – referente à despesa de geração e produção de energia – e o custo de operação e conservação são os principais custos envolvidos nos diferentes tipos de energia. No caso da energia eólica, a maior parte dos gastos está atrelada ao capital, sendo o restante composto por despesas operacionais e de conservação, já que não há custos com combustíveis.

A Organização das Nações Unidas vem alertando ao longo das décadas que o uso de energias renováveis é fundamental para evitar uma catástrofe ambiental e permitindo um futuro sustentável. Logo, gerando uma forma de garantir segurança energética e acesso à energia elétrica facilitado.

De acordo com um estudo da Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), com a aceleração da implementação de energias renováveis, combinada com o aumento da eletrificação e maior eficiência energética, será possível alcançar, até 2050, mais de 90% da redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂).

2.2 VENTO: CONCEITOS BÁSICOS

Em princípio, o vento é definido como a movimentação de massas de ar que se deslocam de áreas de alta pressão para áreas de baixa pressão, sendo influenciado por uma série de fatores geográficos, meteorológicos e físicos. Conforme os estudos de Purificação e Della Fonte (2012), é possível afirmar que a energia eólica é originada do Sol, uma vez que as movimentações da Terra produzem um aquecimento desigual nas camadas atmosféricas, em conjunto com os ângulos de incidência dos raios solares, que geram o vento.

Segundo o artigo Os Ventos, da Fiocruz, os ventos podem ser classificados em: constantes ou regulares, periódicos, variáveis ou irregulares, e locais. Os ventos constantes ocorrem de forma regular e constante na natureza durante o período de um ano, e possuindo características semelhantes e com uma mesma direção podem ser citados como exemplos: alísios, contra-alísios.

Os ventos periódicos ou continentais apresentam direção e intensidades em intervalos de tempo regulares e podem ser associados às estações do ano. Os exemplos que se sobressaem são as monções, que geralmente sofrem alteração na direção dos ventos a cada semestre, e as brisas, que ocorrem diariamente, em que o vento sopra da direção do mar para o continente durante o dia e, à noite, sopra na direção inversa.

Ventos locais ocorrem em regiões específicas e são diretamente influenciados pelas condições geográficas e climáticas dessas áreas, possuindo, assim, características muito individualizadas.

De acordo com Purificação e Della Fonte (2012), a velocidade do vento é determinada pela localização geográfica, altitude e suas variações ao longo do tempo. O potencial eólico é avaliado considerando a altura de referência de 10 metros em relação ao solo e um intervalo de tempo de 10 minutos. O espectro das velocidades do vento é medido durante um período de um mês, com uma avaliação das flutuações nas velocidades.

É possível estabelecer de acordo com Purificação e Della Fonte (2012) que a velocidade dos ventos não pode ser muito elevada ou baixa para a melhor viabilidade de propostas envolvendo o uso de energia eólica, devido às características da curva que rege a velocidade dos ventos.

2.3 BREVE HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA

Sabe-se que a produção de energia eólica remonta aos primórdios da humanidade, quando era necessário reduzir os esforços animais e humanos para atividades essenciais à vida. Assim, a sociedade começou a manusear a força dos ventos para tarefas como a moagem de grãos, bombeamento de água, deslocamento de embarcações e até mesmo o desenvolvimento de técnicas agrícolas.

Tendo em vista os estudos de Purificação e Della fonte (2012), a energia eólica vem sendo utilizada pela humanidade desde o início da civilização, em que começou sua utilização a partir dos barcos à vela; uma das primeiras tecnologias desenvolvidas foi feita na Mesopotâmia em que foi criado um moinho de vento com um sistema de eixo vertical com o objetivo de bombeamento de água. Tal tecnologia foi posteriormente aprimorada pelos Persas com o foco em automatização de tarefas; no qual o funcionamento da turbina ocorre pela assimetria gerada da parede que cobria a metade do rotor, logo as pás de tecidos que eram fixadas no rotor geravam uma força de arrasto para acionamento do rotor.

Ainda conforme Purificação e Della Fonte (2012), aproximadamente em 1000 d.C., na China, a inovação desenvolvida pelos persas foi aprimorada, de forma que a pedra de moer era fixada no eixo, eliminando a necessidade de redirecionar o movimento rotacional e dispensando o uso de caixas de engrenagens para aumentar a velocidade de rotação. Esse método possui similaridade com as características das turbinas eólicas atuais, que podem ser manejadas independentemente da direção dos ventos. O moinho de vento com eixo horizontal – moinho de torre – surgiu na Europa com avanços em relação aos modelos anteriores, devido à utilização de engrenagens de madeira para transmitir o movimento horizontal do eixo para o movimento vertical da pedra de moer grãos. Essa configuração possibilitava atingir maiores velocidades devido à força de sustentação que girava o rotor. Posteriormente de acordo com Purificação e Della Fonte (2012), foram desenvolvidos moinhos de vento do tipo "*Dutch*", que operavam o mesmo sistema do tipo torre, mas cuja construção era mais simplificada, pois substituíam as pedras pesadas por madeira.

Consta de acordo com Purificação e Della Fonte (2012) que a utilização da energia eólica para produzir eletricidade teve início no século XIX, a princípio, com eficiência reduzida devido à combinação de baixas velocidades de operação e rotores

pesados. O responsável por apresentar os conceitos aerodinâmicos nas turbinas eólicas foi Poul La Cour; dessa forma, ele conseguiu garantir uma maior velocidade de rotação e, de modo geral, um processo mais eficiente em comparação com os modelos anteriores.

A partir de Purificação e Della Fonte (2012) no século XX iniciou-se o processo de desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias, design e modelos das turbinas eólicas. Assim, surgiram turbinas eólicas horizontais, como as Smith-Putnam, Gedser e Hutler, e verticais, como as Darrieus e Savonius. Desde a década de 1970, houve um crescente investimento nesse campo de pesquisa devido à crise do petróleo, que teve impacto global tanto na economia quanto no comportamento do consumidor. Diante do iminente colapso da dependência dessa fonte energética, expandiu-se a busca por soluções eficientes de geração de energia com o intuito de substituir o petróleo.

A pesquisa *Renewable Capacity Statistics 2019*, da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), reforça que a crescente preocupação com as alterações climáticas, as consequências da poluição do ar para a saúde, a segurança energética e o acesso à energia, somados aos preços oscilantes do petróleo nas últimas décadas, trouxeram à tona a urgência de produzir e empregar opções tecnológicas de baixo carbono, como as energias renováveis. A energia eólica tem sido uma tecnologia pioneira nas últimas décadas. Sucessora da energia hidrelétrica, a produção eólica é a principal tecnologia produtora de energia renovável.

Sendo assim, com a evolução da tecnologia, os sistemas elétricos e mecânicos presentes nas turbinas eólicas foram se desenvolvendo e tornando-se cada vez mais complexos, com o objetivo de tornar o processo mais eficiente e atender às demandas por energia elétrica.

2.4 PRINCIPAIS COMPONENTES DE TURBINAS EÓLICAS

De forma geral, os componentes mais comuns de uma turbina eólica são: rotor, pás, nacele, torre, gerador, caixa de engrenagens, biruta, eixo e freios conforme consta na figura.

Figura 1 – Representação dos componentes da turbina eólica



Fonte: (MATTEDE, 2024)

Onde a função de tais componentes são:

- Rotor: seção na qual são fixadas em sua parte frontal as pás e responsável pela transmissão da movimentação das pás até o eixo central;
- Pás: realizam a captura da energia cinética proveniente dos ventos e onde a convertem em energia rotacional no eixo do rotor;
- Eixo: transmite a energia rotacional para o gerador;
- Gerador: responsável pela geração de energia elétrica;

- Nacele: fixada junto ao rotor, sendo parecida com uma carcaça de um avião e que abriga caixa de engrenagens, gerador, e outros controladores e equipamentos;
- Caixa de engrenagens: responsável por fazer o aumento da velocidade de rotação do eixo principal e mandar para o secundário.
- Torre: mantém toda a estrutura do equipamento suportando o rotor a nacele a uma altura que seja ao mesmo tempo segura e que as pás possam realizar o seu movimento de forma livre;
- Freios: evitam a rotação do eixo após alguma pane no sistema;
- Biruta: indicador da direção do vento.

2.5 TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS

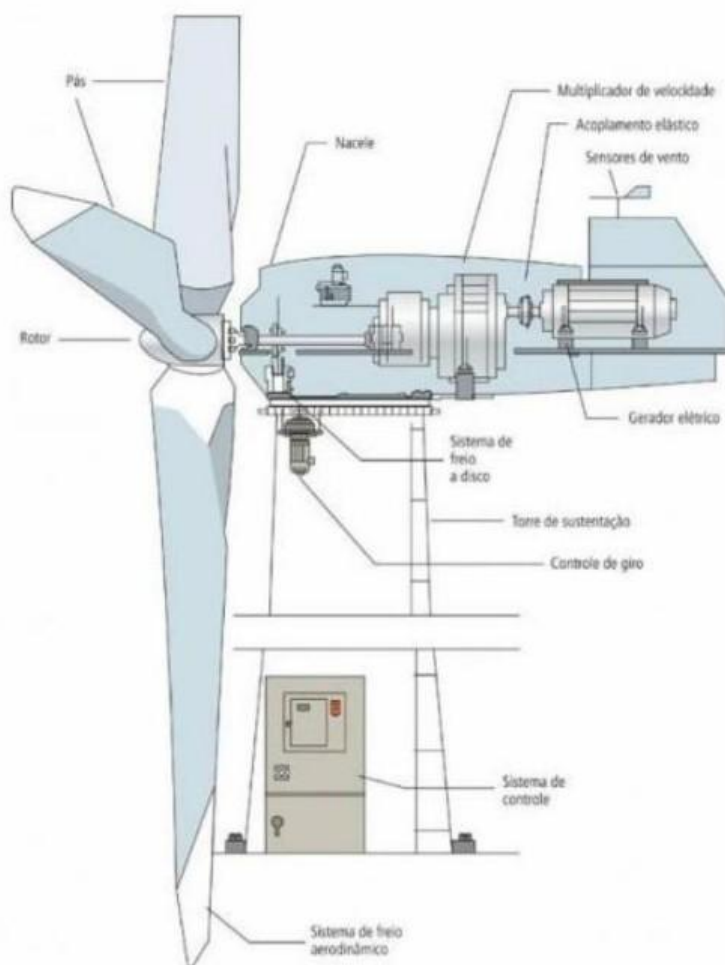
Existem, de forma prática, dois tipos de turbinas eólicas: as turbinas eólicas verticais e as turbinas eólicas horizontais.

Os estudos de Rocha Filho; Vilar; Alves (2018) buscam descrever as turbinas eólicas horizontais, que são as mais comuns e empregadas, devido ao seu maior rendimento aerodinâmico e por serem menos expostas a esforços mecânicos do que as turbinas de eixo vertical. Nessas turbinas, o funcionamento se origina de as forças de sustentação dos ventos, que movimentam as pás. Assim, uma fração da energia cinética gerada é transferida para as pás do rotor e transformando-se em energia rotacional das pás. Com isso, o eixo acoplado às pás começa a girar junto com elas, e, por meio do gerador, é possível transformar a energia rotacional em energia elétrica. As turbinas são classificadas em duas categorias: *upwind*, em que os ventos são soprados pela parte da frente das pás, tendo a estrutura rígida e o rotor direcionado pela direção do vento pelo mecanismo do motor; *downwind*, em que os ventos sopram pela parte de trás das pás e o rotor é flexível e orientado automaticamente.

Em conformidade com Windmill (2024) o uso das turbinas eólicas horizontais apresenta como pontos positivos a eficiência no processo de conversão da energia dos ventos em elétrica e a capacidade de atender a uma grande demanda energética. Em contrapartida, os pontos negativos incluem a poluição sonora em regiões próximas, os impactos na vida selvagem, os custos excessivos relacionados à manutenção devido ao tamanho e complexidade das turbinas, além de que a dimensão é um fator que pode tornar sua instalação desafiadora. Existe também a necessidade constante de se monitorar a velocidade dos ventos para verificar que o equipamento seja mantido em operação.

A figura representa uma turbina eólica de eixo horizontal.

Figura 2 – Representação dos componentes da turbina eólica



Fonte: (ROCHA FILHO; VILAR; ALVES, 2018)

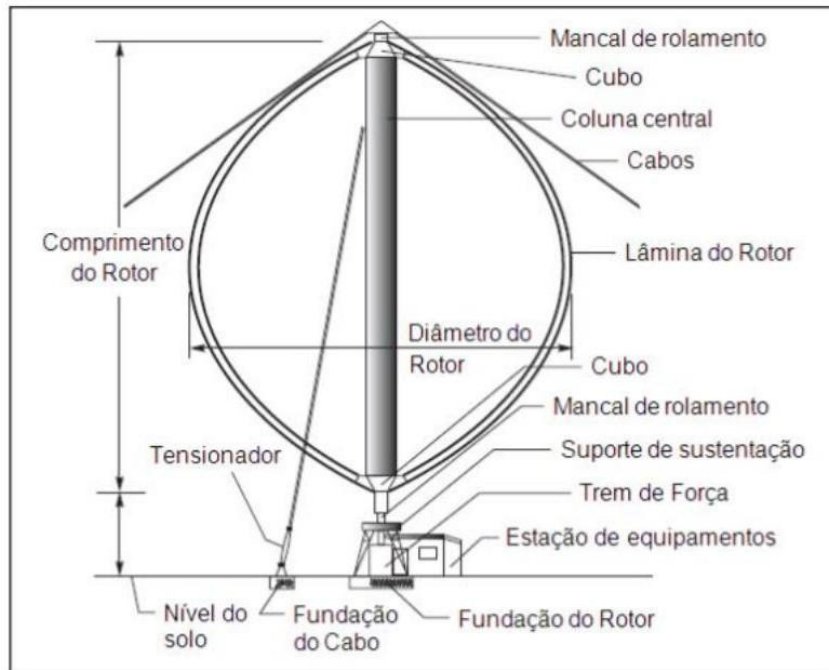
As turbinas eólicas de eixo vertical de acordo com os estudos de Rocha Filho; Vilar; Alves (2018) não exigem mecanismos para ajustar a direção de seu eixo conforme o vento, podendo, dessa forma, ser utilizadas em locais com ventos mais turbulentos. Nessas turbinas, o eixo de rotação é perpendicular ao solo. De maneira geral, não existe um modelo exato ou padrão. Assim, coexistem dois tipos: Darrieus e Savonius.

O tipo Darrieus – consoante aos levantamentos de Rocha Filho; Vilar; Alves (2018) - foi desenvolvido em 1927 por George Darrieus, obtendo o funcionamento a partir da força de sustentação. O rotor é sustentado a partir de duas ou três pás de formato curvo, tendo como força motriz a sustentação aerodinâmica das pás. Devido à sua estrutura, o vento tende a aumentar de velocidade conforme o aumento da

altura da torre, acarretando dificuldade para manter a torre de forma estável em grandes alturas. Ademais, para iniciar a turbina é necessário um sistema de ajuda.

Na figura consegue-se ver um exemplo.

Figura 3 – Turbina eólica vertical Darrius



Fonte: (ROCHA FILHO; VILAR; ALVES, 2018)

Com base nas análises de Rocha Filho, Vilar e Alves (2018), o modelo Savonius foi criado na Finlândia por Sigur Savonius. O funcionamento do rotor ocorre a partir da força de arrasto, fundamentado na substituição das pás por conchas. Ele tende a ser mais econômico, pois o rotor é simplificado e está submetido a menores esforços em comparação com o tipo Darrius; por outro lado, demonstra uma eficiência energética inferior ao tipo Darrius.

Na figura é representado um modelo desse tipo de turbina.

Figura 4 – Turbina eólica vertical Savonius



Fonte: (ROCHA FILHO; VILAR; ALVES, 2018)

Conforme estabelecido por Mattede (2024), alguns dos pontos positivos da utilização de usina eólicas verticais são: as pás ou conchas estão fixadas nos dois extremos do eixo, o que reduz os esforços; são montadas em proximidade ao solo, permitindo a instalação no topo de prédios e edifícios; têm custos de fabricação menores devido às pás serem fabricadas com corda de comprimento constante; a forma de construção facilitada quando comparadas as turbinas eólicas horizontais e a manutenção. Entretanto, alguns pontos negativos são: a instalação fica restrita à locais que possuem base, o modelamento das forças aerodinâmicas é mais complicado em razão da natureza do escoamento, o rendimento é limitado; a estrutura está submetida à vibração acentuada. Em alguns casos, é preciso um suporte para o acionamento.

2.6 PRINCIPAIS CONCEITOS DO *LEAN MANUFACTURING*

O conceito de *Lean Manufacturing* foi desenvolvido inicialmente pela Toyota para a indústria automotiva no Japão, tornando-se mundialmente conhecido como Toyotismo. Surge no contexto de uma nação com graves problemas econômicos e sociais oriundos da 2ª Guerra Mundial, com intuito de garantir e atender demandas com eficiência, conservando o mínimo de estoque e um baixo fluxo de caixa. Esse sistema apresentava uma alternativa ao sistema padrão de produção, que era o modelo de produção em massa – conhecido como Fordismo (BHAMU; SANGWAN, 2014 apud Ikeziri, L. M., Melo, J. C., Campos, R. T., Okimura, L. I., & Junior, J. A. G., 2020).

O Fordismo era fundamentado na automatização do processo de produção e na utilização das linhas de montagem, que uniam todo o processo produtivo a partir de esteira. Tal processo possibilitava uma produção em massa, resultando em uma grande quantidade de produtos produzidos em um tempo reduzido; havia uma grande especialização do trabalho, em que cada colaborador realizava uma operação muito específica, seguindo uma padronização pré-estabelecida. Todavia, era necessário um grande espaço para armazenamento devido ao volume de produção, o que resultava em preços mais baixos para os produtos fabricados. Além disso, o processo era caracterizado por falta de flexibilidade, ou seja, a rigidez excessiva desse modelo de produção não permitia variações para competir em diferentes mercados e produtos (REIS, 2024).

A partir do contexto apresentado, Taiichine Ohno e Eiji Toyoda iniciaram uma melhoria no sistema produtivo, visando o conceito de um processo de produção enxuto, o *Lean Manufacturing*. Nessa gestão, a empresa busca enxugar pontos que geram gastos e desperdícios em todo o processo produtivo e de manufatura, que não agregam valor ao produto final (BALARDIM, 2024).

O termo de *Lean Manufacturing* foi criado no livro “A máquina que Mudou o Mundo” dos autores James Womack, Daniel Jones e Daniel Ross; foi o passo fundamental para a consolidação do uso dos conceitos nas indústrias e nos processos que procuravam a maior eficiência e atendimento de demandas cada vez mais exigentes do mercado (BALARDIM, 2024).

Segundo Cakmakci (2008), o *Lean Manufacturing* é considerado um sistema de produção, que a flexibilidade é levada como a principal. Assim, permite resultados

notáveis nas linhas produtivas e nos processos de pequenos lotes de produtos controlados por métodos que auxiliam na identificação dos desperdícios atendendo às exigências dos mercados.

“As origens do Lean Manufacturing remontam ao período pós-guerra quando o Sistema Toyota de Produção foi concebido com o objetivo de elevar os níveis de eficiência, produzindo cada vez mais com menos. Muitas indústrias em todo o mundo tentaram adotar os seus conceitos, mas poucas organizações tiveram sucesso com as implementações. Aproximadamente 60 anos mais tarde, surge o modelo da Indústria 4.0 alavancado por uma grande evolução das tecnologias, concedendo espaço para a chamada Quarta Revolução Industrial e que vem transformando a forma como a indústria gera valor para o cliente.” (Ikeziri, L. M., Melo, J. C., Campos, R. T., Okimura, L. I., & Junior, J. A. G., 2020 p.12).

Os principais objetivos do Lean Manufacturing são: a redução de custos; o foco na garantia do maior lucro possível; a melhoria contínua dos processos e atividades, sempre buscando renovação e avaliando oportunidades de aperfeiçoamento; o aumento da agilidade de produção; o aumento da capacidade produtiva, considerando uma avaliação prévia para verificar se há demanda para esse crescimento; garantindo que o ambiente de trabalho esteja alinhado à cultura e às questões de qualidade de vida dos colaboradores (BALARDIM, 2024).

Consoante a Pompeu e Rabaioli (2015), dentro do *Lean Manufacturing* existem cinco princípios básicos:

- Valor: determinar, a partir do ponto de vista do cliente, o que agrega valor ou não, ou seja, aquilo que ele julga mais ou menos importante. Para isso, deve-se avaliar em todo o processo produtivo as atividades que agregam valor; que não agregam valor e são necessárias; as que não são necessárias e não agregam valor. Deve-se focar a atenção no último tipo;
- Fluxo de valor: identificar todas as atividades realizadas sequencialmente dentro do processo produtivo, agregando valor ou não, desde o recebimento da matéria-prima até a entrega ao cliente. Diante disso, é possível entender os pontos que podem ser eliminados ou que merecem maior foco. Os tipos de fluxo são os de materiais, pessoas e informações;
- Fluxo contínuo: busca-se que todo o processo aconteça de forma ideal sem tempos de espera entre cada etapa de todo o processo produtivo, ou seja,

buscar que o tempo ocioso entre cada etapa do processo seja o menor possível e desta forma se consegue realizar o processo de forma rápida; consequentemente entregando o produto ao cliente com mais agilidade;

- Produção puxada: o processo produtivo é feito a partir de uma demanda estabelecida previamente e adequada às necessidades do cliente. Dessa maneira, o estoque se torna algo improdutivo, visto que o produto já vai direto para o cliente após a produção;
- Perfeição: as atividades que são executadas na busca pelo aprimoramento jamais devem comprometer a qualidade daquilo que está sendo produzido. Logo, o valor para o cliente deve ser sempre o norte das ações a serem realizadas.

Stone (2012) afirma que a filosofia *Lean Manufacturing* de modo geral se refere à diferenciação entre valor e desperdício. O valor é obtido daquilo que atende às expectativas do cliente no momento correto e com um preço conveniente. Desperdício é tido como tudo aquilo de origem humana que não soma ao valor. Dessa forma, o *Lean* busca incessantemente a redução de desperdícios e tem como foco principal eliminação ou diminuição dos que não geram diretamente em valor agregado ao produto. Desta forma podem ser enquadrados nas seguintes categorias:

- Transporte: a realização de movimentações de produtos, equipamentos e ferramentas acima do que é necessário;
- Estoque: de forma geral, os produtos em estoque são recursos parados; por isso, não existe retorno financeiro, apenas os custos envolvendo o armazenamento, movimentação e até mesmo o risco perca do produto;
- Movimentação: movimentações dos colaboradores além do que é essencial;

- Ociosidade: ocorre quando algum tipo de ativo (físico ou colaborador) não estão disponíveis para a execução de alguma atividade;
- Superprodução: a produção realizada de forma antecipada ou maior em relação a necessidade do cliente;
- Processamento excessivo: fazer alterações de processos isentos de uma demanda do cliente, logo gerando um custo adicional sem uma real necessidade para tal;
- Retrabalho: manifesta-se diante da repetição ou correção de alguma atividade;
- Intelectual: configura-se quando não há aproveitamento dos conhecimentos e capacidades dos funcionários pela empresa.
- Defeitos: o produto não atende as exigências do cliente.

Atualmente, isso tudo é englobado no Sistema Toyota e resultou na principal referência para que as empresas de qualquer porte. Somado a isso, a aplicação do *Lean Manufacturing* é primordial e indispensável. Diante desse método, inúmeras corporações conseguem atender e acompanhar as novas exigências do mercado. Os resultados obtidos através da utilização dessa abordagem são superiores e vantajosos nas relações de produção.

2.7 PRINCIPAIS FERRAMENTAS DO *LEAN* MANUFACTURING

Sabe-se que é essencial buscar a constante evolução em técnicas produtivas. Sendo assim, na busca da melhor execução e utilização dos conceitos de *Lean Manufacturing* são de suma importância a utilização de uma ou diversas ferramentas para que o processo seja executado da melhor forma possível. Com o uso delas é viável atingir um processo de controle da gestão de forma mais eficiente e ágil, consequentemente, garantindo uma melhor alocação de tempo e recursos. Pode-se implementar estratégias que favorecem e facilitam às práticas voltadas para o *Lean*.

Pompeu e Rabaioli (2015) apresenta que um dos meios para auxiliar nesse processo é a 5 S: uma ferramenta que tem como fundamentação cinco princípios ou sensores básicos e aplicáveis; sendo assim, permeando em um dos pilares mais fundamentais para aplicação da metodologia *Lean*, que envolve a empresa como um todo. Tal recurso tem como origem o Japão e busca ser um método para a implementação de organização do posto ou localidade de trabalho. Os conceitos são:

- Senso de Utilização: deixar apenas aquilo que seja imprescindível na execução da atividade;
- Senso de Organização: cada instrumento ou item que seja necessário para uma atividade deve estar em um local estabelecido, com o objetivo de aumentar a agilidade e praticidade;
- Senso de Limpeza: manter o ambiente e local de trabalho livre de sujeiras;
- Senso de Padronização: produção de um controle de padrões para manter que sejam mantidas a limpeza, organização e ergonomia de todo o ambiente de trabalho;
- Senso de autodisciplina: construção de hábitos e padrões que assegurem que todos os padrões sejam executados e respeitados de forma de longo prazo.

Ainda sob a perspectiva de Pompeu e Rabaioli (2015), *Kaizen* é uma palavra japonesa que, em tradução livre, refere-se à melhoria contínua. Essa filosofia é amplamente utilizada no âmbito empresarial, pois pequenos ajustes podem resultar em mudanças efetivas. Nesse sentido, as atividades aplicadas com a premissa do *Kaizen* proporcionam melhorias em todas as áreas e pontos trabalhados pela empresa. Para a implementação, é necessário que haja participação e comprometimento em todos os níveis hierárquicos, para que se possa revisar, alterar e modificar os processos e atividades a fim de aprimorar todas as operações. Assim, as ações de melhoria contínua são mais bem observadas e compreendidas a longo prazo. Alguns passos são comumente seguidos para a implementação dessa metodologia:

- Identificação do problema;
- Fazer um estudo e entendimento da situação;
- Criar e desenvolver atividades de melhoria;
- Implementar as ações;
- Analisar as ações realizadas e comunicar os resultados para equipe de gerenciamento.

Essa ferramenta procura enfatizar processos que envolvam atividades relacionadas à mão de obra em detrimento de processos de máquinas e equipamentos.

Conforme Aguiar (2002), o Ciclo *Plan-do-Check-Act* (PDCA) foi elaborado por Walter A. Shewart, na metade da década de 20 do século XX. O PDCA que é fundamental em toda operação voltada à melhoria de processos de forma contínua, podendo ser aplicada em outros segmentos. Portanto a metodologia segue as seguinte quatro etapas:

- *Plan* ou Planejamento: fase de identificação do que precisa ser melhorado, com o detalhamento de todas as atividades que serão realizadas, os responsáveis por elas e o acompanhamento por meio da estipulação de prazos para um melhor controle;
- *Do* ou Agir: momento de execução das atividades propostas na fase anterior;
- *Check* ou Checar: nessa etapa é verificado e analisado o impacto causado pelas ações que foram efetivadas e avaliando as principais variáveis;
- *Act* ou Agir: nesse ponto, é definido o ponto de ação ou correção a partir da verificação de possíveis falhas que possam ter surgido durante a execução ou o planejamento. Nesse momento, algo que contribui é o uso de lições aprendidas para garantir um melhor controle e registro das ações que podem servir como referência para novos projetos.

A concepção do conceito de *Total Productive Maintenance* ou Manutenção Produtiva Total (*TPM*) é creditada a Seiichi Nakajima e Yoshikazu Takahashi, dois especialistas em manutenção industrial.

“O TPM – Total Productive Maintenance, ou Manutenção Produtiva Total, é um programa criado há duas décadas para diminuir custos de produção. O objetivo do TPM é engajar um senso de união e responsabilidades entre os supervisores, operadores e técnicos da manutenção. A idéia é não se limitar a simplesmente manter o equipamento funcionando, mas também estender e otimizar o seu desempenho global.” (HUTCHINS, 1998, apud TONDATO, 2004 p.32).

O *TPM* é uma ferramenta importante que funciona como um sistema para implementar ações, atividades e verificações, visando aumentar a durabilidade de máquinas e equipamentos, além de proporcionar um acompanhamento que evite a necessidade de intervenções prolongadas. O objetivo é, de forma ativa, diminuir ou eliminar avarias, defeitos, acidentes de trabalho e problemas operacionais.

Alguns de seus pilares são: manutenção preventiva, que estabelece previamente atividades respeitando uma frequência e um tempo estipulados, buscando evitar problemas antes de ocorrerem; manutenção corretiva, que é uma ação geralmente não esperada; reposição adequada, evitando problemas operacionais e ineficiência

do processo; e o gerenciamento eficiente de planos de manutenção, com o objetivo de atender aos requisitos de qualidade do processo.

Um método que pode contribuir para a melhora sequencial é o *KPI (Key Performance Indicator)*. *KPI's*, ou Indicadores-Chave de Desempenho, são recursos utilizados para medir a eficiência de processos, equipamentos e atividades, com o objetivo de atingir padrões definidos ou regulamentações específicas. Dessa forma, ajudam na avaliação da eficácia das atividades executadas dentro da metodologia *Lean Manufacturing* (SANDER, 2024).

A ferramenta SMART também pode auxiliar no aprimoramento de diversos trâmites. SMART é um acrônimo constituído pelas primeiras letras das palavras Specific (Específico), Measurable (Mensurável), Attainable (Atingível), Realistic (Realista) e Time-bound (Tempo limitado) (SANDER, 2024). Os objetivos guiados por esses critérios são uma forma de definir as metas a serem atingidas; o planejamento deve ser específico, mensurável, atingível, realista e com prazo definido. Dessa forma, é possível traçar um gerenciamento fundamentado em pontos que podem ser acompanhados, direcionados e liderados pela equipe de gestão.

3 LEAN MANUFACTURING E A MANUTENÇÃO

A utilização de ferramentas e conceitos do *Lean Manufacturing* (Manutenção enxuta) na manutenção foca na execução de uma revisão enxuta, com o objetivo de aumentar a disponibilidade de máquinas e equipamentos, garantindo maior eficiência e produtividade. Para atingir isso de acordo com Musso (2024) é fundamental diminuir ou excluir atividades que não agregam valor, dentre tais pontos podem ser destacados:

- Atividades sem foco definido: os esforços da equipe são alocados em locais que não são prioritários ou que não seguem um cronograma previamente definido;
- Estoque de peças em estado crítico: nesse ponto, o estoque deve sempre buscar uma quantidade padrão para atender as necessidades e criticidade das operações. Ter uma quantidade muito grande ou menor pode acarretar situações que podem atrapalhar o sistema de gestão em determinados momentos;
- Equipe de manutenção: envolve a equipe, os principais fatores são o nível de formação e ou qualificação da equipe para realizar uma determinada atividade, a variação na qualidade dos trabalhos executados, as equipes com plantel pequeno ou alto em relação à demanda de serviços;
- Base de dados para gestão: dados precisos, rápidos e confiáveis são de extrema importância para a execução de atividades corretivas, programação de cronogramas de manutenção, geração de relatórios e acompanhamento de indicadores de gestão de forma facilitada;
- Processos: os processos de manutenção devem estar diretamente ligados aos sistemas de qualidade, produção e outros, a fim de eliminar a falta de uma

definição clara e objetiva sobre como cumprir o fluxo de trabalho. Isso evita a ausência de padronização na execução de serviços, possibilitando uniformizar e comparar ações de maneira eficaz.

- Estratégias: ponto primordial de toda a gestão da manutenção, a escolha por quais atividades e processos devem ser executados, bem como a frequência. Assim sendo, qualquer erro pode gerar um efeito cascata e influenciando em todos os processos que dependem. As estratégias devem ser sempre feitas a partir de um conjunto de fatores como: resultados de *KPI's*, histórico, necessidade de ajustes a condições e experiência dos gestores da área.

A manutenção enxuta tem como uma das suas principais bases a aplicação da ferramenta *TPM* - explicada anteriormente - que permite um maior acompanhamento, controle de todo processo e facilita a implementação. Tem como alguns pilares: a busca por melhorias nos processos e máquinas dos processos; a procura por qualificação da equipe; o foco em manutenção preventiva; o incentivo para que os operadores sejam responsáveis pelo zelo da sua área de atuação e o trabalho dos gestores em conjunto com a equipe a partir de dados e informações. Por fim, a segurança deve ser o foco de todas as ações da equipe e a procura por manter os padrões de qualidade pré-estabelecidos.

De acordo com Rosales (2024) forma geral os principais aspectos que orientam as ações de uma manutenção *Lean* são:

- Manutenção preventiva: a grande maioria dos esforços é direcionado às ações de forma preventiva. Diante disso, é seguido todo um planejamento estrutural e estabelecido a fim de evitar intervenções corretivas. O trabalho é realizado com uma ampla gama de dados para a melhor definição das atividades e frequências;
- Trabalho padronizado: deve-se priorizar que todos os processos sejam feitos da mesma maneira. Há toda uma gestão de documentação com as principais informações e guias para que as atividades sejam executadas, assegurando que não ocorram grandes variações;

- Gestão de estoque: garante que existam, de forma fácil e prática, peças de reposição, em uma quantidade que seja apropriada e considerando em conta todo o processo;
- Confiabilidade: busca-se garantir uma maior confiabilidade de equipamentos ou máquinas com o uso de tecnologias de monitoramento e acompanhamento. Desse modo, é viável avaliar o real estado do maquinário e definir, de forma mais precisa e no tempo adequado, qual ação deverá ser tomada em função da situação;
- Ordens de serviço: cria uma sistemática de controle de todas as atividades de manutenção para que sejam encaminhadas a um sistema, em que um responsável filtrará o grau de prioridade e o responsável para atuar;
- Proatividade: os funcionários procuram agir sempre com o propósito de avaliar as situações das máquinas e equipamentos antes de ocorrer algum chamado ou problema com o objetivo de evitar que ocorra uma paralisação desnecessária;
- Equipe multifuncional: utiliza uma equipe que possui diferentes conhecimentos e atende as necessidades e a avaliação da situação de forma prática e rápida.

A busca por uma manutenção enxuta é cada vez mais relevante. Em especial, diante da demanda por equipamentos com operações de períodos prolongados e com um grau de confiabilidade aceitável. As intervenções devem ser realizadas em intervalos menores, sem perder o foco na qualidade. Nesse contexto, a integração com *softwares* e programas técnicos torna-se indispensável para avaliações, controle e simulações em prazos reduzidos.

4 METODOLOGIA DE UMA PROPOSTA DE PLANO DE MANUTENÇÃO À TURBINA EÓLICA VERTICAL

Diante da busca de uma melhor eficiência em turbinas eólicas verticais será apresentado um plano de manutenção seguindo os conceitos de *Lean Manufacturing*. A proposta que será apresentada possibilitará a aplicação tanto para o modelo Darrieus quanto para o Savonius, será envolvido a utilização de: *Total Productive Maintenance (TPM)* e Manutenção Preventiva. Todas as atividades que serão propostas têm por base uma série de fatores como: as forças que atuam sobre as pás, as indicações e os manuais fornecidos por fabricantes, os trabalhos acadêmicos junto de sites especializados sobre o tema.

A *TPM* recomendada será fundamentada em referências, verificações e atividades que não requerem conhecimentos técnicos de manutenção mecânica, elétrica ou demais áreas para ser aplicada. Logo, poderá ser executada por um operador/colaborador da máquina bem como o responsável da turbina. Já, a manutenção preventiva é direcionada aos profissionais com conhecimentos específicos, a fim de que as atividades sejam executadas adequadamente. Geralmente, esse desenvolvimento inclui atribuições que podem interferir no padrão operacional e de confiabilidade da máquina e que são capazes de gerar possíveis acidentes em determinados casos.

A definição do plano será feita a partir dos seguintes componentes: rotor, eixo, pás, torre, caixa de câmbio, sistema de controle, base ou fundação e freios. Esses componentes são os mais comuns entre os modelos. Assim, viabilizando a aplicação em diversos contextos.

Posto isso, um ponto que fica a critério da situação e necessidade específicas é a utilização de *KPI's* para controle de todo o processo. A designação pode ser feita levando alguns fatores como: a disponibilidade do equipamento; o tempo envolvendo paradas inesperadas; a eficiência energética; o acompanhamento de gastos, avaliação de retornos de investimentos e outros pontos. O uso de indicadores envolvendo principalmente o contexto industrial ou em grandes complexos torna-se indispensável, considerando o grau de investimento que é feito e a relação para averiguar a eficiência do plano de manutenção que está sendo realizado.

Um dos indicadores que podem ser aplicados é o *Mean Time Between Failures* ou o Tempo Médio Entre Falha (*MTBF*) é um parâmetro de Manutenção muito importante para análise e controle gerencial, o indicador informa o intervalo de tempo entre de falhas ou intervenções, assim há a busca por valores maiores, ou seja, o equipamento em questão deve demorar mais tempo para falhar. Outro índice possível de ser usado é *Mean Time To Repair*, em português Tempo Médio de Reparo, (*MTTR*) também é um indicador de Manutenção muito relevante para a gestão de manutenção. Com ele, é viável avaliar quanto tempo é necessário para realizar o conserto de um equipamento ou máquina, após acontecer alguma parada. Por meio dessa métrica busca-se uma diminuição do tempo, isto é, o tempo de intervenção do equipamento é baixo após acontecer alguma parada. *MTBF* e *MTTR* são relacionados à disponibilidade do equipamento, à quantidade e ao tempo gasto em intervenções não programadas. Ademais, levam em conta a avaliação de energia gerada em um dado tempo, a disponibilidade para a geração de energia, nível de confiabilidade do equipamento e o retorno sobre o investimento feito.

A *TPM* que será proposta envolverá verificações e atividades diárias, semanais e quinzenais no qual tem por objetivo fazer ações que sejam simples, práticas e rápidas realizáveis por operadores e ou responsáveis para verificar algumas situações e condições de operação do equipamento e máquina. Diante disso, consegue de forma sistemática ver e acompanhar a condição dos equipamentos e assim ver sinais iniciais de falhas, no qual se evita uma falha com intervenções maiores e além garantir o melhor funcionamento do equipamento como um todo, logo garantindo uma maior disponibilidade do equipamento.

O documento da *TPM* foi criado utilizando o software *Microsoft Excel*, podendo ser preenchido tanto de forma eletrônica ou física, apenas exigindo que seja feita a impressão do documento. O documento é composto pela figura 5 que é a folha de preenchimento do documento e pela figura 6 em que estão descritas todas as atividades que devem ser executadas e suas devidas instruções, todas essas figuras serão representadas a seguir:

Figura 5 – Folha de preenchimento da TPM

MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL (TPM) - TURBINA EÓLICA VERTICAL							
Itens	01/01/2025	02/01/2025	03/01/2025	04/01/2025	05/01/2025	06/01/2025	07/01/2025
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
Itens	08/01/2025	09/01/2025	10/01/2025	11/01/2025	12/01/2025	13/01/2025	14/01/2025
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
Itens	15/01/2025	16/01/2025	17/01/2025	18/01/2025	19/01/2025	20/01/2025	21/01/2025
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
Itens	22/01/2025	23/01/2025	24/01/2025	25/01/2025	26/01/2025	27/01/2025	28/01/2025
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
Itens	29/01/2025	30/01/2025	31/01/2025				
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Fonte: (AUTÓRIA PRÓPRIA, 2024)

Figura 6 – Folha de controle dos itens da TPM

MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL (TPM) - TURBINA EÓLICA VERTICAL							
Descrição das atividades da TPM - TURBINA EÓLICA VERTICAL							
ITEM	COMPONENTE	DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES OU VERIFICAÇÕES	MATERIAIS	FREQUÊNCIA	EXECUTANTE	LEGENDA	
1	PÁS	VERIFICAR SE AO LONGO DAS PÁS EXITEM DANOS QUE SEJAM VISÍVEIS	NÃO APLICA	DIÁRIO	OPERADOR OU RESPONSÁVEL	OK	VERIFICAÇÃO OU ATIVIDADE FICOU DENTRO DOS PARÂMETROS E CRITÉRIOS DEFINIDOS
2	EIXO	VERIFICAR SE EXISTEM PONTOS EM QUE SEJA VISÍVEL DESALINHAMENTO OU TORÇÃO	NÃO APLICA	DIÁRIO	OPERADOR OU RESPONSÁVEL		
3	TORRE	VERIFICAR EXISTEM AO LONGO DA ESTUTURA PONTOS COM DEFORMAÇÕES, CORROSÃO OU DANOS APARENTES	NÃO APLICA	DIÁRIO	OPERADOR OU RESPONSÁVEL	NOK	VERIFICAÇÃO OU ATIVIDADE FICOU NÃO ESTÁ DENTRO DOS PARÂMETROS E CRITÉRIOS DEFINIDOS
4	FUNDAÇÃO	VERIFICAR EXISTEM AO LONGO DA ESTUTURA PONTOS COM DEFORMAÇÕES, CORROSÃO OU DANOS APARENTES	NÃO APLICA	DIÁRIO	OPERADOR OU RESPONSÁVEL		
5	PÁS	FAZER A LIMPEZA DAS PÁS RETIRANDO POEIRA, SUJEIRA OU OUTROS ELEMENTOS QUE ESTEJAM PRESENTE NAS PÁS	PANO OU ESCOVA LISA, ÁGUA E PRODUTOS DE LIMPEZA GERAIS	SEMANAL	OPERADOR OU RESPONSÁVEL	NT	TURBINA NÃO TRABALHOU OU OPEROU. ITEM NÃO PRECISA SER EXECUTADO NA DATA
6	TORRE	FAZER A LIMPEZA DA TORRE RETIRANDO POEIRA, SUJEIRA OU OUTROS ELEMENTOS QUE ESTEJAM PRESENTE NA TORRE	PANO OU ESCOVA LISA, ÁGUA E PRODUTOS DE LIMPEZA GERAIS	SEMANAL	OPERADOR OU RESPONSÁVEL		
7	FUNDAÇÃO	FAZER A LIMPEZA DA FUNDAÇÃO RETIRANDO POEIRA, SUJEIRA , VEGETAÇÃO QUE ESTEJAM AO LONGO DA FUNDAÇÃO	PANO OU ESCOVA LISA, ÁGUA E PRODUTOS DE LIMPEZA GERAIS	SEMANAL	OPERADOR OU RESPONSÁVEL		

Fonte: (AUTÓRIA PRÓPRIA, 2024)

Esses documentos encontrados nas figuras 5 e 6 têm janeiro de 2025 como mês de referência, para cada item da folha de preenchimento há uma instrução do que precisa ser feito. A legenda da figura 6 deve ser tomada por base para completar as lacunas. Os itens que são semanais são deixados em aberto para variar diante da opção de quando será executado, assim visando adequar-se diferentes cenários e planejamentos. O preenchimento da figura 5 deve ocorrer sempre seguindo uma mesma rotina e de preferência antes que esteja efetivamente operando ou no princípio da operação. Caso ocorram casos em que apareça a legenda NOK, esse é o momento para que o responsável ou operador informa imediatamente serviço de manutenção que pode ser interno ou externo, dependendo do contexto em que a turbina esteja instalada.

Resumidamente, A *TPM* é um documento que garante, a partir de verificações ou serviços de limpeza, que a turbina eólica vertical consiga trabalhar com seu maior rendimento. Em determinados casos, facilita verificar possíveis problemas antes de ocorrer ações de manutenção preventiva. Dessa forma, garante-se uma ação que precede o problema, com atitudes mais efetivas, que previnem prováveis problemas – causadores de acidentes e de eficiência do processo.

O documento da figura 5 deve ser atualizado mensalmente, consegue-se realizar com comprometimento, rotina de execução das atividades propostas e um importante

histórico de funcionamento do equipamento. Consoante a isso, é praticável a revisão da frequência de execução e a adição de mais verificações, em alguns casos, a remoção. Tudo isso contribui com a manutenção preventiva, pois a *TPM* é uma verificação simplificada da eficiência do plano de manutenção preventiva que está sendo realizado.

A manutenção preventiva é feita a partir de dois documentos base que foram feitos utilizando o software *Microsoft Excel*, encontrados nas figuras 7 e 8, que são um cronograma da frequência de execução das atividades a serem feitas – figura 7, junto de um checklist de execução das atividades - figura 8 que serão cumpridas por uma equipe de manutenção interna ou externa. Serão representados alguns exemplos dos documentos propostos.

Figura 7 – Representação do cronograma elaborado

Legenda		CRONOGRAMA DO PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA											
Executado	Planjado												
Atrasado	Reprogramado												
Item	Frequência	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	Mensal												
2	Mensal												
3	Mensal												
4	Trimestral												
5	Trimestral												
6	Semestral												
7	Semestral												
8	Anual												
9	Anual												
10	Anual												
11	Anual												
12	Anual												

Fonte: (AUTÓRIA PRÓPRIA, 2024)

Figura 8 – Representação do checklist elaborado

CHECKLIST DA EXECUÇÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA - TURBINA EÓLICA VERTICAL			
ITEM	STATUS DA VERIFICAÇÃO	RESPONSÁVEL(EIS)	Nome:
1			Nome:
2			Nome:
3			
4		DATA	
5			
6			
7			
8		STATUS DE VERIFICAÇÃO	APROVADO
9			REPROVADO
10			NÃO VERIFICADO
11			
12			
ITEM	COMPONENTE	DESCRIÇÃO DAS VERIFICAÇÕES	FREQUÊNCIA
1	Sistema de Controle	Realizar uma checagem geral do funcionamento do sistema, sensores de velocidade e de frenagem	Mensal
2	Eixo	Realizar a lubrificação dos rolamentos do eixo	Mensal
3	Caixa de câmbio	Realizar a lubrificação das engrenagens presentes na caixa de câmbio	Mensal
4	Eixo	Realizar a lubrificação dos rolamentos do eixo, caso seja necessário trocar	Trimestral
5	Caixa de câmbio	Realizar a lubrificação das engrenagens presentes na caixa de câmbio, caso seja preciso trocar do mesmo	Trimestral
6	Gerador	Realizar uma inspeção completa do sistema elétrico do gerador, verificando estado das conexões e outros componentes elétricos	Semestral
7	Freios	Realizar uma inspeção completa do sistema de frenagem, verificando estado das componentes, testes de operação e acompanhar a resposta do sistema aos testes	Semestral
8	Pás	Realizar uma inspeção do estado de conservação das pás e bem como um estudo das condições de operação e destaste das mesmas	Anual
9	Eixo	Verificar e caso necessário corrigir o alinhamento do eixo.	Anual
10	Torre	Checar ao longo da estrutura de forma detalhada possíveis pontos que apresentem deformações, rachaduras ou corrosão.	Anual
11	Fundação ou base	Checar ao longo da estrutura de forma detalhada possíveis pontos que apresentem deformações, rachaduras ou corrosão.	Anual
12	Turbina	Verificar e inspecionar para avaliar todos os pontos que existam soldas e fixações, e caso necessário fazer o reparo.	Anual

Fonte: (AUTÓRIA PRÓPRIA, 2024)

Consegue-se de observar e verificar, forma clara e objetiva, realizando o uso do conjunto do cronograma com o *checklist* - lista de verificação, em português. O exemplo da figura 7 do cronograma mostra um plano de todos os itens da proposta, conforme os trabalhos vão sendo executados, o documento deve ser atualizado. Espera-se que todas as atividades sejam executadas de acordo com a frequência fixada na figura 8, porém em determinados casos é necessário rever a execução de acordo com as situações não previstas.

Tais atividades e trabalhos devem ser produzidos por uma manutenção interna ou externa. A execução de forma adequada de todos os itens é fundamental para que não seja diminuída a vida útil do equipamento e não ocorra perda de eficiência do processo em conversão de energia. O controle da execução das atividades ocorre a partir do *checklist* (figura 7) e para cada caso, o responsável pela execução da atividade vai avaliar os pontos que foram executados a fim de obter um controle de

registro do que foi feito e da situação geral do equipamento. Assim, consegue-se ter um histórico consistente.

A partir do histórico das manutenções preventivas, obtêm-se informações que são valiosas para o entendimento e controle das condições reais de operação do equipamento. Com esse levantamento, pode ser estabelecido um ponto de partida de revisão geral de todo o plano de manutenção.

Com a utilização dos documentos e controles propostos nas figuras 7 e 8 espera-se que a turbina eólica vertical consiga operar de forma consistente e contínua ao longo da sua vida útil esperada - por volta de 30 anos. Com os planos apresentados devem ser sempre revistos e revisados para atender a real situação de operação da turbina. Desse modo, buscando sempre o encontro pela melhoria contínua. Todos os esforços são extremamente valiosos para contribuir com a forma de geração de energia renovável e limpa. Assim, colabora-se para uma forma de reduzir os impactos do avanço do aquecimento global desenfreado, que atinge a todos.

5 CONCLUSÃO

A partir da execução do estudo, é possível observar a importância da energia eólica no desenvolvimento e evolução da humanidade. A crescente importância ficou em evidência devido as mudanças climáticas, que tendem a tornar-se mais intensas, caso não haja uma revisão dos meios de produção de forma geral.

Nesse contexto, a utilização e o uso das turbinas eólicas verticais ganham um destaque principal por serem voltadas para a aplicação em centros urbanos, algo que pode ser uma fundamental para forma de produção de energia elétrica e redução do uso de produtos à base de combustíveis fósseis.

A partir disso, pode-se concluir que o plano de manutenção proposto trabalhado com conceitos do *Lean Manufacturing* tende a garantir que o processo e utilização das turbinas seja feito com a melhor eficiência possível. Assim garantindo que as turbinas consigam operar de forma contínua por aproximadamente 30 anos, que é em média sua vida útil.

6 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Pode-se enfatizar para eventuais novas pesquisas e trabalhos futuros a realização e proposição de um plano de manutenção preditiva que visa acompanhar de forma mais detalhada as variações da vibração, os esforços submetidos e outros. O emprego de *softwares*, como o *Protheus*, para a automatização em todo o processo de manutenção preventiva e *TPM*, principalmente, em contextos mais críticos é fundamental para uma melhor eficiência de gerenciamento.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, S. **Integração das ferramentas da qualidade ao PDCA e ao seis sigma**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2002.

APLASTIK. **Fordismo**: o que é, qual a história e quais as características. Disponível em: <https://aplastik.com.br/fordismo-o-que-e-qual-a-historia-e-quais-as-caracteristicas/>. Acesso em: 15 set. 2024.

BALARDIM, E. **Lean manufacturing**: o que é, objetivos e princípios. Disponível em: <https://fia.com.br/blog/lean-manufacturing/amp/>. Acesso em: 08 set. 2024.

BHAMU, J.; SANGWAN, K. S. *Lean manufacturing: literature review and research issues*. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 34, n. 7, p. 876-940, 2014.

CAKMAKCI, M. *Process improvement: performance analysis of the setup time reduction-SMED in the automobile industry*. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 41, n. 12, 2008.

CAMPOS, C.; RODRIGUES, M.; OLIVEIRA, R. *Lean manufacturing: produção enxuta*. **Revista Científica e-Locução**, v. 1, n. 10, p. 18, 30 dez. 2016.

COUTINHO, T. **Descubra o que é lean manufacturing na prática e entenda o funcionamento dessa filosofia**. Disponível em: <https://voitto.com.br/blog/artigo/lean-manufacturing>. Acesso em: 15 ago. 2024.

FIOCRUZ. **Os ventos**. Disponível em: <https://www.fiocruz.br/biosseguranca/Bis/infantil/ventos.html>. Acesso em: 06 ago. 2024.

GUTERRES, A. **A energia renovável é o único caminho confiável para o mundo evitar uma catástrofe climática**. Discurso na 13ª Sessão da Assembleia da Agência Internacional de Energia Renovável, IRENA, 2023. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2023/01/1808107>. Acesso em: 06 ago. 2024.

IKEZIRI, L. M.; MELO, J. C.; CAMPOS, R. T.; OKIMURA, L. I.; JUNIOR, J. A. G. A perspectiva da indústria 4.0 sobre a filosofia de gestão *lean manufacturing*. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 1274–1289, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/5999>. Acesso em: 25 nov. 2024.

IRENA. **Future of wind: deployment, investment, technology, grid integration, and socio-economic impacts**. 2019. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind>. Acesso em: 15 ago. 2024.

IRENA. ***Innovation landscape for a renewable-powered future: solutions to integrate renewables***. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind>. Acesso em: 15 ago. 2024.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p. 1304, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/nL6x7dJv9gJv7HnkTSJRLfS/>. Acesso em: 26 set. 2024.

MATTEDE, H. **Energia eólica, como funciona?** Disponível em: https://www.mundodaeletrica.com.br/energia-eolica-como-funciona/#google_vignette. Acesso em: 09 set. 2024.

MIYAKE, D. **Programas de melhoria da produtividade e qualidade: um estudo comparativo dos modelos "just-in-time" (JIT), "total quality control" (TQC) e "total productive maintenance" (TPM)**. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Acesso em: 26 out. 2024.

MUSSO, M. **Lean manufacturing na manutenção: como reduzir desperdícios**. Disponível em: <https://traction.com/blog/lean-manufacturing-na-manutencao>. Acesso em: 22 set. 2024.

NASCIMENTO, F.; ARRUDA, L. Energia eólica: uma alternativa sustentável. **Revista Científica do Centro Acadêmico São José**, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2021. Disponível em: <https://revista.saojose.br/index.php/cafsj/article/view/100>. Acesso em: 21 ago. 2024.

NEVES, C. **Implementação de ferramentas lean na produção de pás de turbinas eólicas offshore**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial), Universidade de Coimbra, Coimbra, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10316/86004>. Acesso em: 22 ago. 2024.

PETRONAS. **Lean manufacturing na gestão da manutenção**. Disponível em: <https://inovacaoindustrial.com.br/lean-manufacturing-na-gestao-da-manutencao/>. Acesso em: 23 set. 2024.

POMPEU, A. M.; RABAIOLI, V. A filosofia *lean manufacturing*: seus princípios e ferramentas de implementação. **Multitemas**, [S. l.], n. 46, 2015. Disponível em: <https://www.multitemas.ucdb.br/multitemas/article/view/173>. Acesso em: 26 set. 2024.

PURIFICAÇÃO, L.; DELLA FONTE, R. **Estudo de turbinas eólicas verticais com exemplo de dimensionamento de uma turbina eólica darrieus para aplicação em edifícios**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012. Disponível em: https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/estudo_d_e_turbinas_eolicas_verticais_com_exemplo_de_dimensionamento_de_uma_turbina_eolica_darrieus_para_aplicacao_em_edificios.pdf. Acesso em: 05 ago. 2024.

REIS, T. **Fordismo**: conheça esse importante método de produção. Disponível em: <https://www.sunno.com.br/artigos/fordismo/>. Acesso em: 18 set. 2024.

ROCHA FILHO, R.; VILAR, Z.; ALVES, I. **Estudo da turbina eólica convencional e com levitação magnética**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia), Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/40f96a2a-70da-464e-91291578f5dd6427/content#:~:text=Existem%20duas%20classifica%C3%A7%C3%B5es%20de%20turbinas,TEEH%20s%C3%A3o%20mais%20utilizadas%20comercialmente>. Acesso em: 09 set. 2024.

ROSA, E.; TAVARES, L. **Proposta de implementação do lean manufacturing em uma multinacional de bioenergia**: um estudo de caso. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

SANDER, C. **Top 10 ferramentas do lean manufacturing**: suas funções e benefícios. Disponível em: <https://frons.com.br/blog/gestao-empresarial/ferramentas-lean-manufacturing/>. Acesso em: 22 set. 2024.

SANTOS, V. **O que é a manutenção lean ou manutenção enxuta?** Como funciona? Disponível em: <https://www.fm2s.com.br/blog/o-que-e-manutencao-lean-ou-manutencao-enxuta-como-funciona/amp>. Acesso em: 24 set. 2024.

SENAI. **Conheça as 6 principais ferramentas do lean manufacturing**. Disponível em: <https://www.senairs.org.br/industria-inteligente/conheca-6-principais-ferramentas-do-lean-manufacturing>. Acesso em: 21 set. 2024

STONE, K. B. *Four decades of lean: a systematic literature review*. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 3, n. 2, p. 112-132, 2012.

TONDATO, R. **Manutenção produtiva total**: estudo de caso na indústria gráfica. 2004. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/5167>. Acesso em: 26 out. 2024.

TOTVS. **Conheça 11 ferramentas de lean manufacturing**. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/ferramentas-de-lean-manufacturing/>. Acesso em: 20 set. 2024.

WINDMILL, A. **Quais são as diferenças entre turbinas eólicas de eixo horizontal e turbinas eólicas de eixo vertical?** Disponível em: <https://www.automaxxwindmill.com/pt/blogs/turbina-eolica-1/quais-sao-as-diferencas-entre-turbina-eolica-de-eixo-horizontal-e-turbina-eolica-de-eixo-vertical>. Acesso em: 10 set. 2024.