



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

NATASHA MILENA DOS SANTOS DA SILVA

Implementação de um sistema de projeção a laser para a melhoria da segurança,
qualidade, produtividade e custos em uma indústria de pás eólicas.

Cabo de Santo Agostinho - PE

2022

NATASHA MILENA DOS SANTOS DA SILVA

Implementação de um sistema de projeção a laser para a melhoria da segurança, qualidade, produtividade e custos em uma indústria de pás eólicas.

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Área de concentração: Engenharia de processos.

Orientador: Prof. Dr. João Gutemberg Farias Filho

Coorientador: Dr. Israel Lira Gonçalves

Cabo de Santo Agostinho - PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586i Silva, Natasha Milena dos Santos da
Implementação de um sistema de projeção a laser para a melhoria da eficiência no processo produtivo de pás eólicas /
Natasha Milena dos Santos da Silva. - 2022.
51 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Joao Gutemberg Farias Filho.
Coorientador: Dr. Israel Lira .
Inclui referências.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em
Engenharia Eletrônica, Cabo de Santo Agostinho, 2022.

1. Energia eólica. 2. Pás eólicas. 3. Sistema de projeção a laser. 4. Laser tracking. I. Filho, Prof. Dr. Joao Gutemberg
Farias, orient. II. , Dr. Israel Lira, coorient. III. Título

CDD 621.3

NATASHA MILENA DOS SANTOS DA SILVA

Implementação de um sistema de projeção a laser para a melhoria da segurança, qualidade, produtividade e custos em uma indústria de pás eólicas.

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovado em: 06 de Outubro de 2022

Banca Examinadora

Prof. Dr. João Gutemberg Farias Filho
Orientador, UACSA, UFRPE

Prof. Dr. Flavio da Silva Vitorino Gomes,
UFPB
Examinador

Prof. Dr. Philippe Eduardo de
Medeiros, UFRN
Examinador

Dedico este trabalho à minha mãe e às minhas irmãs, por acreditarem em mim e por estarem presente durante toda a trajetória.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Josimere, por ser exemplo de força, dedicação e sempre me incentivar durante toda a minha trajetória.

Às minhas irmãs, Heloísa e Clara, por acreditarem muito em mim e serem o principal motivo da minha persistência ao longo da vida.

Ao meu orientador, professor Gutemberg, por ter me aceito como aluna e por ter sido tão compreensível durante todo o processo de escrita.

Aos meus professores Flávio, Ania e Reinel. Cada um teve uma participação durante a minha vida acadêmica que contribuiu positivamente para eu me tornar a profissional que sou hoje.

Aos meus amigos, Léo, Luigi, Ricardo, Lisandre, Sidney, Daniel, Laura, Gabriel, Paula e Maykon por ter dado suporte, tanto emocional quanto acadêmico, durante essa trajetória e tornando-a mais leve. Os momentos de conversa e saídas foram muito importantes.

Aos meus amigos do trabalho, Israel, Karol, Camyla, e Ivana por todo o companheirismo e suporte ao longo desse tempo. O equilíbrio entre o dia a dia no trabalho e as saídas depois (sempre que possível) contribuiu bastante.

Coragem e persistência diante dos reverses.

- Daniel Goleman

RESUMO

A indústria de energia eólica está ganhando cada vez mais espaço na matriz energética brasileira. O aerogerador é o sistema utilizado para gerar a energia elétrica e ele é composto por vários componentes, dentre eles, as pás eólicas, que estão se tornando cada vez maiores para viabilizar uma maior geração de energia. Os processos de manufatura de turbinas eólicas tipicamente são de mão de obra intensiva e exige o uso de trenas e gabaritos para realizar a marcação solicitadas no procedimento de trabalho e auxiliar o posicionamento dos materiais durante o processo produtivo. Porém, as trenas são suscetíveis a erros operacionais e é necessária uma rotina de calibração constante, já os gabaritos, por serem normalmente uma estrutura metálicas têm o risco de acidentes e todo o posicionamento e retirada do gabarito durante o processo exige um tempo do processo. Diante disso, o trabalho apresenta o desenvolvimento realizado para a implementação de um sistema de projeção a laser em uma indústria de pá eólica visando a melhoria da eficiência e segurança durante os processos que envolvam marcações e posicionamento de material, fazendo com que a empresa possua vantagem competitiva no mercado, melhorando os indicadores de desempenho da empresa. A metodologia utilizada para implementar o sistema é detalhada neste documento e uma comparação entre os processos antes e depois são apresentados, com fim de mensurar os ganhos obtidos relacionados a quantidade de etapas envolvidas no processo, quantidade de pessoas e tempo necessário para realizar a atividade. Como resultados deste trabalho, foi observado que o sistema de projeção a laser aparece como uma boa alternativa para substituir o uso de trenas e gabaritos durante o processo produtivo de pás eólicas, pois podem reduzir em até 43% o número de etapas durante o processo produtivo, impactando em uma redução de aproximadamente 30 % do tempo de ciclo dos três principais processos de produção de pás eólicas.

Palavras-chaves: energia eólica; pás eólicas; sistema de projeção a laser; *laser tracking*.

ABSTRACT

The wind energy industry is getting more and more space in the Brazilian energy matrix. The wind turbine is the system used to generate electricity and it is composed of several components, among them, the wind blades, which are becoming increasingly larger to enable greater energy generation. The manufacturing processes of wind turbines are typically labor intensive and require the use of measuring tapes and templates to perform the marking required in the work procedure and assist the positioning of materials during the production process. However, the measuring tapes are susceptible to operational errors and a constant calibration routine is necessary; the templates, as they are normally a metallic structure, have the risk of accidents and all the positioning and removal of the template during the process requires a time of the process. Therefore, the work presents the step by step used for the implementation of a laser projection system in a wind blade industry aiming at improving efficiency and safety during the processes involving markings and material positioning, aiming the company have a competitive advantage in the market and improve the business key performance indicators. The methodology used to implement the system is detailed in this document and a comparison between the before and after processes are presented, in order to measure the gains obtained related to the number of steps involved in the process, number of people and time necessary to perform the activity. As a result of this work, it was observed that the laser projection system appears as a good alternative to replace the use of measuring tapes and templates during the production process of wind blades, as they can reduce the number of steps during the process by up to 43%, which has direct impact in the cycle time reduction of approximately 30 % of the three main production processes of wind blades.

Key-words: wind energy; wind blades; laser projection system; laser tracking.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Turbinas eólicas com eixo vertical	19
Figura 2	Turbinas eólicas com eixo horizontal	19
Figura 3	Componentes dos aerogeradores com eixo vertical	20
Figura 4	Prospecção do crescimento das turbinas eólicas	21
Figura 5	Principais partes da pá eólica	22
Figura 6	Visão do corte transversal da pá eólica	23
Figura 7	Posicionamento das almas na casca	23
Figura 8	Fluxo do processo de produção de pá eólica	24
Figura 9	Plano de infusão	26
Figura 10	Processo de colagem das cascas	28
Figura 11	Exemplo de um sistema de projeção a laser	31
Figura 12	Fluxograma da implementação de um sistema de projeção a laser	31
Figura 13	Fluxograma das etapas utilizadas para implementação do sistema de projeção a laser	38
Figura 14	Etapas da primeira calibração	42
Figura 15	Passo a passo de validação dos arquivos de projeção	44
Figura 16	Arquitetura de rede utilizada	51
Figura 17	Formato do arquivo gerado para calibração	52
Figura 18	Comparação da quantidade de etapas	57
Figura 19	Comparação do tempo de atividade	57
Figura 20	Análise do ganho real	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Riscos e AEL das Classes Laser	30
Quadro 2	Mapeamento do processo de layup	45
Quadro 3	Continuação do mapeamento do processo de layup	46
Quadro 4	Mapeamento do processo de infusão	48
Quadro 5	Mapeamento do processo de fechamento	49
Quadro 6	Mapeamento do processo de layup após a implementação do sistema	53
Quadro 7	Mapeamento do processo de infusão após a implementação do sistema	55
Quadro 8	Mapeamento do processo de fechamento após a implementação do sistema	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-aided manufacturing</i>
CFM	Mantas de filamento picado
CLP	Computador lógico programável
CSM	Mantas de filamento Contínuo
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
IEC	International Electrotechnical Commission
KPI	<i>Key-Performance Indicators</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
TEC	<i>Temperature-critical components</i>
TEEH	Turbinas eólicas com eixo horizontal
TEEV	Turbinas com eixo vertical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Geral	16
1.3.2	Específicos	16
1.4	Organização do trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Componentes da turbina eólica	18
2.2	Pás eólicas	22
2.3	Processo de manufatura da pá eólica	24
2.4	Sistema de projeção a laser	28
2.4.1	Metrologia 3D e sistemas de projeção a laser	32
2.4.2	Características dos projetores	33
2.4.3	Funcionalidades do software	34
2.5	Indicadores utilizados para medir desempenho da empresa	34
3	METODOLOGIA	38
3.1	Estudo sobre usabilidade do sistema	39
3.2	Análise do sistema adequado para a área produtiva	39
3.3	Instalação física e elétrica do sistema	40
3.4	Realização do laser tracking	41
3.5	Execução da calibração do sistema do sistema	42
3.6	Teste dos arquivos de projeção na área produtiva e análise dos ganhos obtidos	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Mapeamento do processo antes da implementação do sistema	45
4.2	Componentes utilizados e arranjo do sistema	50
4.3	Laser tracking e calibração	52
4.4	Processo de produção de pás eólicas utilizando o sistema a laser	53
4.5	Análise de ganhos	56
4.6	Ganhos reais	58
5	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A energia eólica, produzida a partir da força do vento, que movimenta as turbinas eólicas e aciona um gerador capaz de transformar as massas de ar em eletricidade, possui um histórico de crescimento constante no Brasil ao longo dos últimos anos, estando em maior destaque entre as matrizes energéticas sustentáveis brasileiras. De acordo com Cunha *et al.* (2021), a energia eólica ocupa segundo lugar na matriz energética brasileira, representando 8.46% da capacidade instalada.

As turbinas eólicas são compostas por mais de 800 componentes (Olabi *et al.*, 2021), mas podem ser resumidas em cinco partes: torre, hub, rotor, nacele e pás eólicas. Dando ênfase ao processo de manufatura da pá eólica, ele pode ser dividido em 6 principais processos: corte de tecidos e formação de kits, posicionamento das camadas no molde (*layup*), infusão, colagem, fechamento e desmoldagem.

Durante a maioria dos processos mencionados acima são utilizadas fitas métricas, gabaritos e dispositivos auxiliares para realizar as marcações necessárias e evitar erros operacionais durante o processo produtivo. Porém, o método majoritariamente utilizado atualmente durante o processo de manufatura de pá ainda possui alguns pontos a melhorar, pois continua sujeito a erros operacionais e os dispositivos auxiliares são caros e de difícil manuseio, gerando problemas de segurança, qualidade, produtividade e, consequentemente, custo.

Com foco em melhorar a segurança e eficiência do processo produtivo, alguns fabricantes de pás eólicas estão investindo em sistema de projeção a laser para ser utilizado durante as etapas da manufatura do produto. A projeção a laser é uma ferramenta que visa dar assistência ao operador durante o processo produtivo, pois projeta um modelo virtual na superfície de trabalho, seja ela curva ou plana. O sistema de projeção a laser é composto pelo software, cujo o objetivo é ler, modificar e exportar arquivos em CAD (*Computer-Aided Design*) e o hardware, que possui no seu interior fontes de alimentação, fotodiodos, receptor infravermelho, sistema de

resfriamento e dentre outros subcomponentes. A funcionalidade do sistema consiste em vários projetores com alcances sobrepostos que cobrem todo o comprimento da pá. Para trabalhar mais rápido em ferramentas grandes, as áreas de trabalho podem ser divididas e atribuídas a diferentes projetores. Os projetores permitem que equipes que trabalham na mesma área realizem diferentes tarefas simultaneamente. Embora algumas indústrias de manufaturas de pás eólicas ainda utilizem o método convencional de marcação com fitas métricas e/ou gabaritos ou dispositivos auxiliares, a utilização de sistemas de projeção a laser aparece como uma alternativa muito importante para evitar erros operacionais e, conseqüentemente, problemas estruturais no produto, eliminar riscos com ergonomia, reduzir os custos e evitar retrabalhos. Com isso em mente, este trabalho tem como objetivo principal apresentar a forma de funcionamento de sistemas de projeção a laser com o intuito de apontar e analisar os seus benefícios em uma indústria de manufatura de pá eólica.

1.2 Justificativa

Com o crescimento da indústria de energia eólica, as turbinas eólicas estão se tornando cada vez maiores, com cada vez mais subcomponentes e novas tecnologias associadas a isso e todo esse processo de mudança carrega consigo alguns desafios. O primeiro deles é continuar realizando o processo de manufatura de forma segura e sem riscos ergonômicos para o time operacional, o segundo é garantir as especificações do produto a fim de assegurar as características estruturais da pá eólica, o terceiro é buscar alternativas para que o processo de manufatura aconteça de maneira ótima, visando a otimização dos custos, cumprimento de plano de entrega para o cliente e eliminação de defeitos gerados no produto durante a produção.

O sistema proposto neste trabalho busca atuar de forma eficiente nos gargalos produtivos durante o processo de manufatura de pás eólicas, visando acompanhar o crescimento tecnológico no ramo da energia eólica. Além disso, apontar alternativas para tornar o processo produtivo cada vez mais seguro, aumentar a produtividade e eficiência são os pontos focais do trabalho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Este projeto tem como objetivo implementar um sistema de projeção a laser em uma indústria de pás eólicas, visando melhorar a segurança, produtividade e eficiência da empresa.

1.3.2 Específicos

- Apresentar e descrever os componentes utilizados para gerar energia elétrica;
- Estudar e descrever as etapas do processo produtivo na indústria de pás eólicas;
- Propor o sistema de projeção a laser utilizado para o desenvolvimento do projeto e expor a aplicabilidade durante os processos de manufatura de pás eólicas;
- Propor a estrutura de redes utilizada para realizar a comunicação entre os projetores;
- Descrever os indicadores utilizados na indústria para medir o desempenho da empresa;
- Estimar os ganhos obtidos para a empresa com a implementação do sistema de projeção a laser.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2, será apresentada a fundamentação teórica deste trabalho, de modo a apresentar os componentes da turbina eólica, o processo de manufatura de pás eólicas, sistemas

de projeção a laser e os indicadores utilizados para medir o desempenho da empresa. No Capítulo 3 detalha a metodologia, onde será abordado um estudo feito a respeito da usabilidade do sistema, uma análise realizada para saber qual o sistema de projeção a laser adequado para a área produtiva, como se deu a instalação física e elétrica do sistema, a realização do *laser tracking*, como se deu a calibração do sistema e as etapas necessárias para testes do arquivo de projeção na área produtiva. Logo após, no Capítulo 4, associado aos resultados e discussões, foi realizado um mapeamento do processo antes e depois da implementação do sistema a laser e a análise dos ganhos obtidos. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas a partir do desenvolvimento do trabalho e dos resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

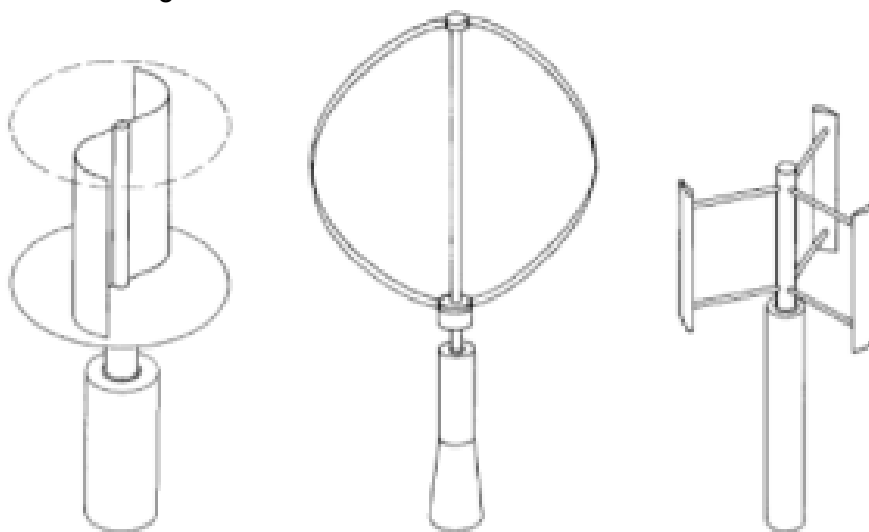
Neste capítulo, é apresentado uma revisão bibliográfica relativa aos conceitos associados a energia eólica, os processos de manufatura executados durante a produção de pás eólicas. Além disso, é abordado uma explicação sobre metrologia 3D e como esse conceito está relacionado aos sistemas de projeção a laser utilizado pelas indústrias.

2.1 Componentes da turbina eólica

A indústria de energia eólica está ganhando cada vez mais espaço no mercado mundial. De acordo com informações do *World Economic Forum* (Masterson, 2022) a geração de energia eólica aumentou 14% no ano de 2021. A Ember (2022) afirma que a energia eólica foi responsável por gerar 6.59% da eletricidade mundial no ano de 2021. De acordo com o balanço energético nacional de 2022 divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), a geração eólica teve um crescimento de 26,7% em relação a 2020 no Brasil.

Essa energia é gerada através de uma turbina eólica (ou aerogerador), que consiste em uma estrutura cuja função é realizar a conversão da energia cinética do vento para energia elétrica. Tais estruturas se distinguem quanto a posição do eixo das pás da turbina e pela sua potência. Os tipos de turbinas encontradas são as Turbinas Eólicas com Eixo Vertical (TEEV) e as Turbinas Eólicas com Eixo Horizontal (TEEH), ilustradas nas *Figuras 1* e *2* respectivamente (Beraldo, 2019). A vantagem da TEEV é a facilidade de operação de manutenção, visto que a instalação do gerador fica junto ao solo e não há a necessidade de dispositivos de direcionamento do rotor. Em contrapartida, esse tipo de estrutura tem tamanho limitado, inviabilizando seu uso em projetos de grande porte. Já a classe TEEH é amplamente empregada e possui maior aproveitamento energético se comparado ao tipo TEEV, além disso possui aplicações tanto *onshore* (ou seja, a turbina é posicionada em terra) quanto *offshore* (turbinas posicionadas em alto mar), o que amplia as áreas disponíveis de geração (Dellezzopolles Júnior, 2011).

Figura 1 – Turbinas eólicas com eixo vertical.



Fonte: Hau & Renouard (2003)

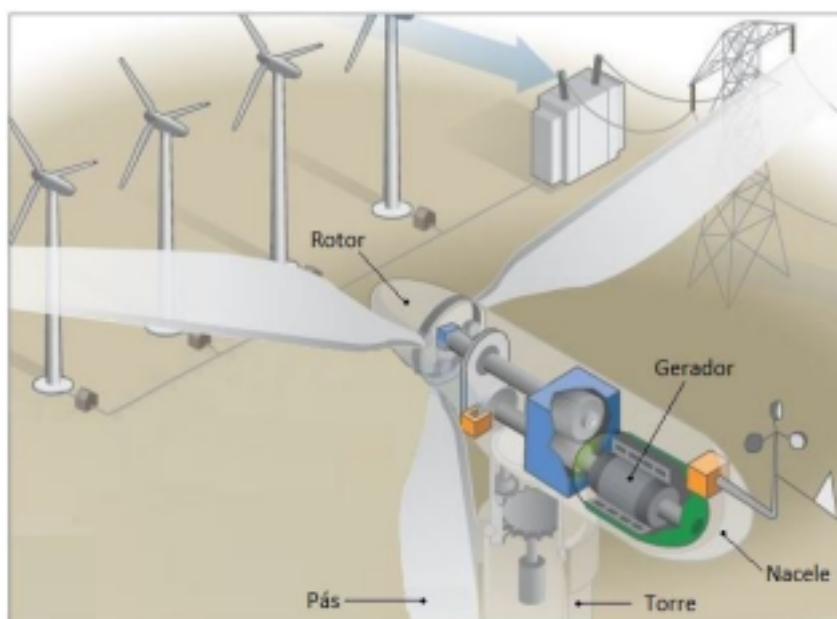
Figura 2 – Turbinas eólicas com eixo horizontal.



Fonte: Tong (2010)

Os aerogeradores do tipo TEEH são compostos por uma infinidade de componentes, mas podemos categorizar esses componentes em cinco principais partes, conforme é ilustrado na *Figura 3* e listados abaixo:

Figura 3 – Componentes dos aerogeradores com eixo vertical.



Fonte: Beraldo (2019)

- Nacelle: é um compartimento instalado no alto da torre composto por caixa multiplicadora, gerador, chassis, sistema de yaw, sistema de controle eletrônico e sistema hidráulico.
- Torre: é o elemento que sustenta o rotor e a nacelle na altura apropriada ao seu funcionamento. Embora a maioria das torres sejam de aço, como foram originalmente construídas, hoje já existem outros modelos com diferentes tipos de material como o concreto.
- Rotor: é o elemento de fixação das pás que tem a função de transmitir o movimento de rotação para o eixo de movimento lento. Um dos seus principais componentes é o sistema hidráulico que permite o movimento das pás em distintas posições para otimizar a força do vento ou parar a turbina por completo. O diâmetro do rotor é um parâmetro importante durante o design da turbina eólica pois ele é diretamente proporcional à quantidade de energia gerada pelo aerogerador.
- Gerador: converte a energia mecânica do eixo em energia elétrica.
- Pás: são perfis aerodinâmicos projetados de forma a garantir a melhor

obtenção da energia do vento. E para isso, elas são produzidas com materiais leves e resistentes, como a fibra de vidro ou de carbono.

De acordo com (Padmanathan *et al.*, 2019) um dos pontos focais nas áreas de pesquisa atualmente está relacionado em diminuir o peso da nacelle, aumentar o diâmetro do rotor e aumentar a geração de energia.

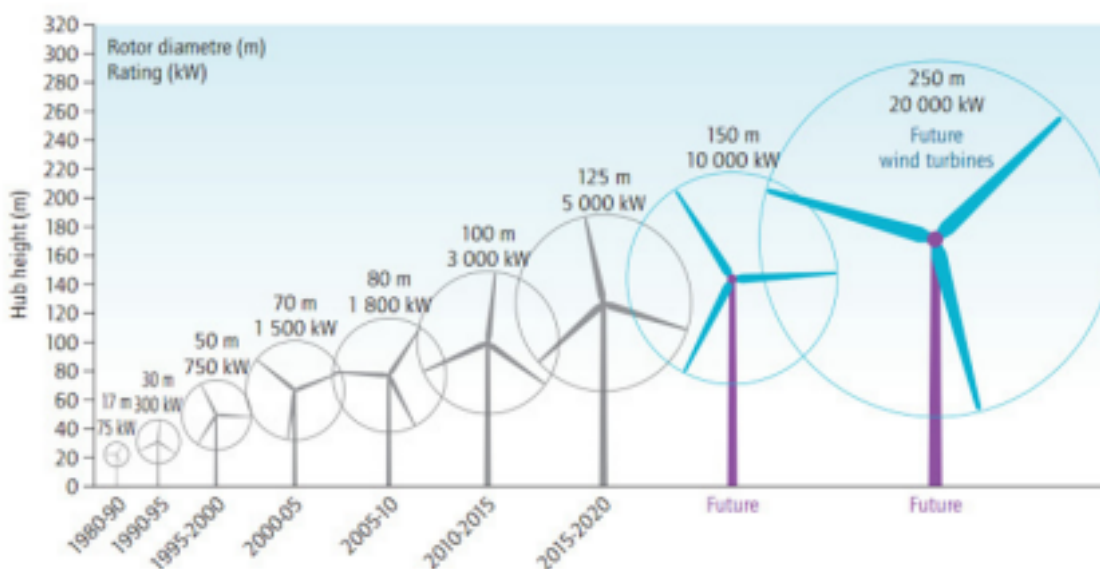
A equação 2.1 ilustra a relação entre a velocidade do vento e a potência P de uma turbina eólica. C_p é o coeficiente de potência, que define a fração de potência do vento que será convertida pela turbina em trabalho mecânico, o seu valor teórico é no máximo 0,593. A densidade do ar é dada por ρ , A é a área varrida pelas pás e U é a velocidade do vento (Burton *et al.*, 2011).

$$P = \frac{1}{2} C_p A U^3 \rho \quad (2.1)$$

A equação acima é importante pois com ela pode-se concluir que a potência da turbina é quadruplicada se dobrar o diâmetro do rotor.

A *Figura 4* ilustra o crescimento das turbinas eólicas desde 1980 e a sua prospecção.

Figura 4 – Prospecção do crescimento das turbinas eólicas



Fonte: Wiser *et al.* (2011)

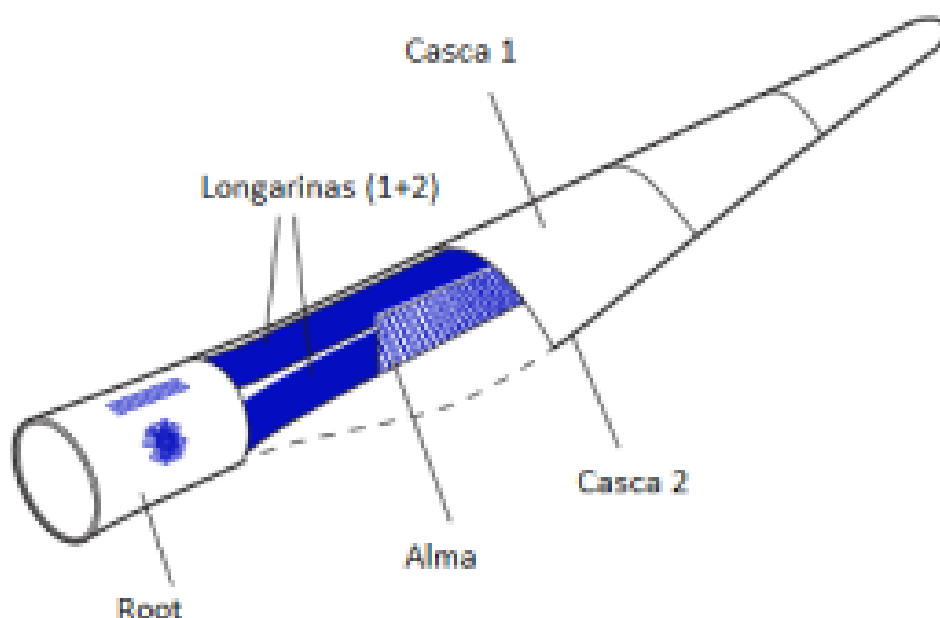
Como é possível observar, as pás eólicas estão se tornando cada vez maiores com o passar do tempo. Na sessão abaixo será feito a abordagem a

respeito das partes existentes em uma pá eólica de eixo horizontal.

2.2 Pás eólicas

A principal função da pá é capturar o vento e transferir a carga para o eixo, e isso cria um momento de flexão no rolamento da raiz e um torque no eixo principal. A *Figura 5* ilustra as 4 partes principais da pá: cascas, longarinas, almas e raiz (Jensen *et al.*, 2019).

Figura 5 – Principais partes da pá eólica.



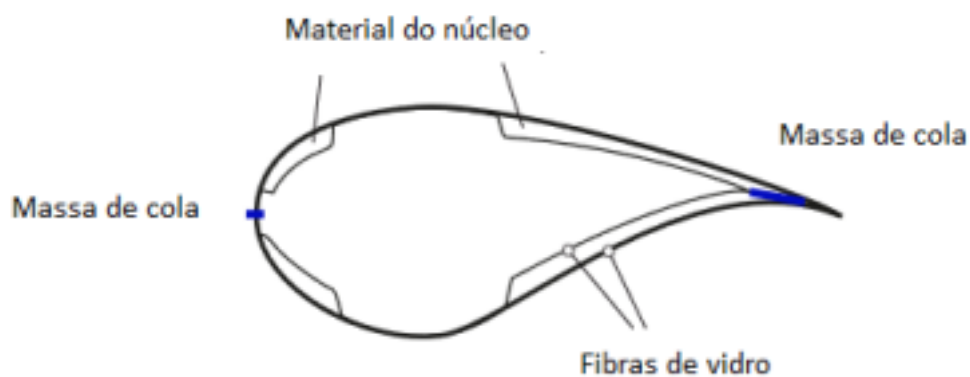
Fonte: Jensen *et al.* (2019)

As cascas são longos painéis aerodinâmicos cujo objetivo é transferir carga. Tipicamente elas são montadas em dois moldes separadamente e coladas uma na outra utilizando uma massa de cola. A *Figura 6* ilustra uma visão transversal de uma casca, onde é possível verificar a sua composição: Camadas de fibra de vidro, massa de cola e material do núcleo (Jensen *et al.*, 2019).

As longarinas são os componentes que basicamente suportam a maior parte da carga aerodinâmica durante a operação das pás e transfere-as para a raiz cilíndrica. Elas são infundidas com as cascas e algumas pás possuem duas longarinas em cada casca, onde se denomina, usualmente, de longarina principal e

longarina secundária.

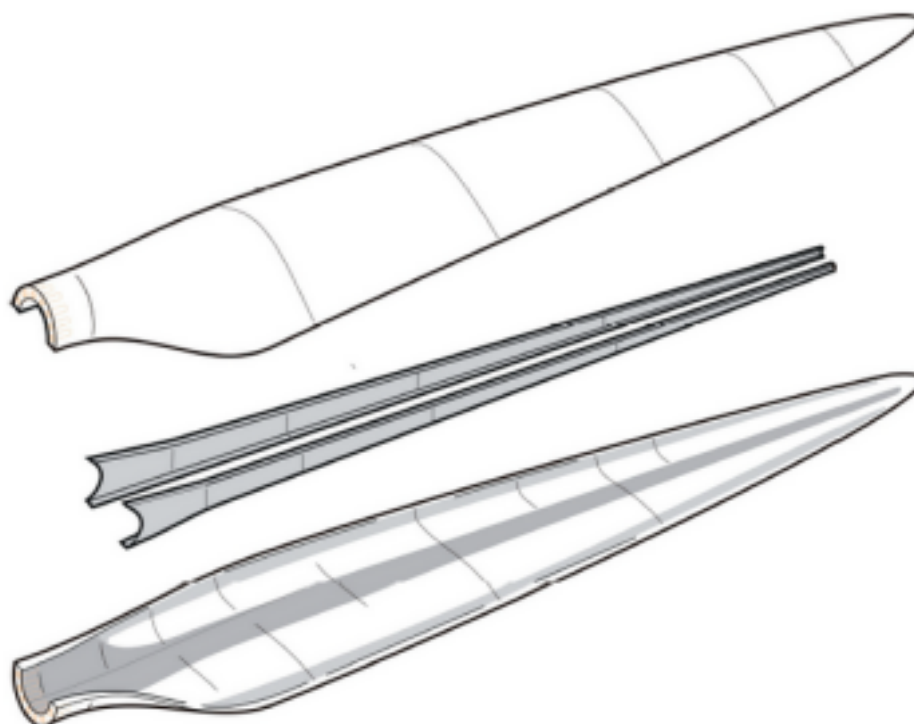
Figura 6 – Visão do corte transversal da pá eólica.



Fonte: Jensen *et al.* (2019)

As almas são componentes que exercem a função de ligar as duas cascas, fazendo com que a pá se comporte como uma viga e mantenha sua rigidez. Esses componentes têm função estrutural de manter a geometria da pá. A *Figura 7* ilustra as almas sendo posicionadas nas cascas.

Figura 7 – Posicionamento das almas na casca.



Fonte: Mishnaevsky Jr *et al.* (2017)

A raiz é a região onde ocorrem os maiores esforços da pá. Sua principal função é transmitir o momento de flexão da pá para o rolamento de maneira uniforme, sem danificá-lo. Geralmente é espessa, pois nela são acomodados alguns parafusos. As pás atuais são desenvolvidas para ter um tempo de vida de 20-30 anos (Tong, 2010) e o método de manufatura tem influência direta nesse aspecto.

2.3 Processo de manufatura da pá eólica

De acordo com (Jensen *et al.*, 2019), os procedimentos de fabricação da pá podem gerar condições no compósito que irão influenciar no tempo de vida, o tempo de fadiga e falhas potenciais na pá. Essas condições incluem variações locais na homogeneidade da mistura da resina, variações locais de porosidade, curvatura local da fibra e posicionamento incorreto das fibras, bem como tensões residuais locais. Tais condições são variáveis em todas as manufaturas de compósitos processos e devem ser considerados no projeto. A *Figura 8* ilustra de forma genérica os passos de manufatura de uma pá eólica.

Figura 8 – Fluxo do processo de produção de pá eólica.



Fonte: Adaptação de Jensen *et al.* (2019)

A etapa de preparação dos kits de fibras consiste em realizar os pré-cortes de cada camada de fibra que será utilizada posteriormente no molde. Cada empresa utiliza diferentes equipamentos para realizar os pré cortes, como por exemplo

desbobinadeiras juntamente com *encoder* para realizar a contagem do tamanho da camada, o que torna o trabalho semi automático e com menos chances de erros operacionais; ou até mesmo trenas e/ou fitas métricas e, nesse caso, o trabalho é completamente manual. A decisão de qual forma esses pré-cortes são realizados é particular de cada empresa.

O processo de preparação do molde consiste em realizar a limpeza da superfície de cada casca onde as fibras serão posicionadas. Além disso, algumas empresas fazem a pintura do molde neste momento ao invés de realizar o procedimento após o processo de desmoldagem. O objetivo principal desta etapa é cobrir a pá com uma tinta protetora contra raios solares e intempéries.

Após o processo de preparação do molde, é dado início ao processo de aplicação de fibras em cada casca, popularmente conhecido na indústria eólica como layup. Esse processo carrega consigo alguns subprocessos que são feitos de forma sequencial e outros que são feitos de forma paralela. Quando se fala de aplicação de fibras, estamos falando dos mais variados tipos de fibras: Uniaxial, biaxial, triaxial, CSM (mantas de filamento picado), Combi (manta de Fibra combinada), CFM (manta de filamento contínuo). Fibras essas que possuem suas variações entre si em termos de gramatura e de matéria prima base (podendo ser vidro ou carbono) e são aplicadas em diferentes áreas da casca durante o processo de layup, de acordo com o design da pá. Essas camadas são cortadas previamente no processo de pré-cortes e aplicadas pelo time operacional no molde, normalmente utilizando trenas para auxiliar na marcação da área de aplicação de acordo com especificações do design referentes à posição longitudinal e transversal de cada camada. De acordo com Albanesi *et al.* (2018), a ordem de aplicação das camadas, a quantidade de camadas e as áreas de sobreposição das camadas possui impacto direto nas propriedades estruturais da pá.

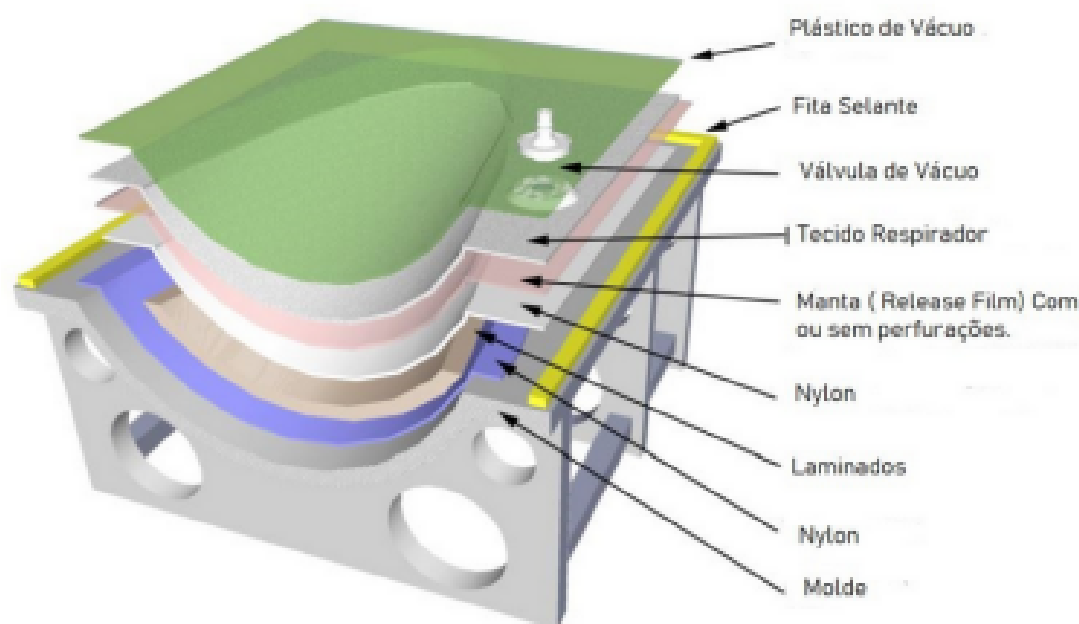
Além de fibras de vidro, os materiais de núcleo, que tipicamente utilizam a balsa ou espuma de alta densidade, são posicionados em áreas definidas de acordo com a especificação durante o processo de layup (Ricci, 2012). Para o subprocesso de aplicação do material do núcleo são tipicamente utilizados nas indústrias trenas para definir a área de aplicação do material.

Além disso, alguns projetos de pás eólicas contemplam a utilização de

longarinas, que são normalmente produzidas utilizando perfis de carbono pultrudado. Tais longarinas também são posicionadas durante o processo de aplicação de fibras do molde. Tipicamente são utilizados alguns dispositivos auxiliares e trenas para auxiliar durante o posicionamento da longarina. O objetivo dos dispositivos auxiliares é guiar a posição transversal que a longarina deve ser posicionada e as trenas auxiliam na posição longitudinal correta.

Uma vez todas as camadas de fibras, material do núcleo e, em alguns casos, longarinas estarem aplicadas na casca, é o momento de iniciar o processo de preparação para a infusão. Tal processo consiste em preparar toda a superfície do molde, que já está coberta pelos materiais do layup, para receber a resina. Em algumas indústrias esses materiais já são enviados em formas de kits previamente prontos para ser feito a aplicação na casca diretamente, evitando tempo gasto na montagem individual de cada material. O kit de preparação para a infusão comumente usado é composto por um material de nylon, uma manta, tecido respirador, válvulas de vácuo, fita selante e plástico de vácuo, conforme é ilustrado na *Figura 9*. Tipicamente são utilizadas trenas para realizar a marcação da posição onde os itens devem ser posicionados para garantir uma infusão de qualidade.

Figura 9 – Plano de infusão.



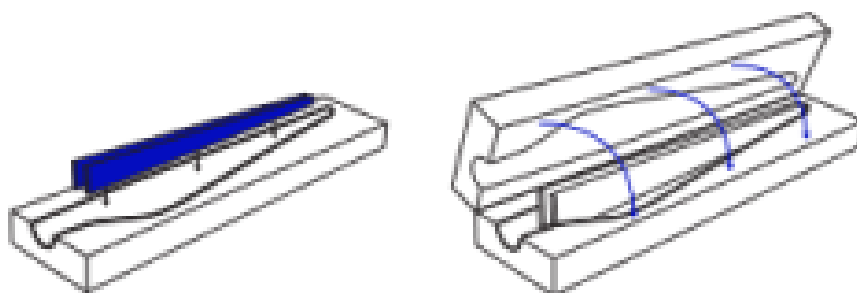
Fonte: Marinho (2021)

Faz parte do processo de preparação para infusão a adição dos perfis de entrada, que são adicionados com o objetivo de viabilizar a entrada de resina na casca. Vários perfis de entradas são utilizados para que possam ser abertos em uma sequência pré definida, possibilitando controlar o fluxo de resina. Antes de iniciar a infusão propriamente dita, é aplicado um sistema de vácuo na casca para remover todo o ar existente e, por fim, é iniciado o processo de infusão, que só acaba quando todas as camadas de fibra estão envolvidas com resina (Koefoed, 2003).

Antes da resina ser injetada no plano de infusão, ela é misturada com um catalisador, cujo objetivo é realizar uma reação química para que aconteça a solidificação do material. Tal processo se caracteriza como exotérmico, ou seja, as moléculas de resina estão se rearranjando de forma mais rígida e expulsam a energia do sistema em forma de calor. Assim que a resina está totalmente curada, são removidos os materiais consumíveis: manta, respirador, plástico de vácuo e selante. O nylon só é removido minutos antes de iniciar a preparação para o fechamento das cascas, pois sua função é deixar a superfície áspera para futuros processos de colagem.

A preparação para o fechamento das cascas pode variar a depender do tipo de tecnologia que está sendo utilizado na fabricação da pá em questão. Porém, existem procedimentos que são padrões e independe da tecnologia aplicada, como por exemplo: utilização de guias para posicionar a alma (sem cola aplicada) e realizar a demarcação da área onde a alma será aplicada, utilização de gabaritos para posicionar retentores para a alma, aplicação de tiras de espumas para delimitar a área de aplicação de cola em algumas partes específicas da casca e marcação e aplicação do flange, cujo o objetivo é auxiliar durante a união das duas cascas. Somente após todos os passos acima terem sido seguidos, é o momento de aplicar massa de cola nas áreas que foram demarcadas e delimitadas, para que em seguida aconteça o posicionamento da alma. Tipicamente, a alma é posicionada primeiro na casca inferior, para que em seguida a casca superior vá ao encontro da alma que já está posicionada na casca superior. A *Figura 10* ilustra esse processo.

Figura 10 – Processo de colagem das cascas.



Fonte: Jensen *et al.* (2019)

Quando o processo de cura das massas de cola é finalizado, o molde é aberto e a pá é retirada para seguir para o processo de retirada das rebarbas, é feita a inspeção externa da pá para gerar o relatório dos defeitos encontrados e os reparos são realizados. Por fim, a pá passa pelo processo de acabamento para em seguida ser embalada em estruturas metálicas e estocada, aguardando o melhor momento para ser enviada para o parque eólico. Durante todas estas etapas dos processos mencionados acima são utilizados fita métrica, gabaritos e dispositivos auxiliares para realizar a marcação e evitar erros operacionais durante o processo produtivo. Porém, o método atual utilizado durante o processo de manufatura de pá ainda possui algumas lacunas, pois continua sujeito a alguns erros operacionais e alguns dispositivos auxiliares são caros e de difícil manuseio, gerando problemas de segurança, qualidade, produtividade e, consequentemente, custo.

2.4 Sistema de projeção a laser

Laser é um acrônimo para “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação). É caracterizado como uma radiação eletromagnética produzida pelos átomos devido a alteração do estado da energia de alguns materiais (Dowden, 2009). Os átomos que possuem estado de maior energia emitem laser na forma de luz através de um processo conhecido como “emissão estimulada” e, com a ajuda de espelhos, esse laser é amplificado em um meio laser adequado, produzindo assim um fluxo semelhante a luz (Nayak; Padhye, 2016).

A luz produzida pelo laser possui quatro características: monocromática,

coerência espacial e temporal, colimação e alta intensidade, o que a distingue da luz natural. A luz monocromática é conhecida como luz branca e é gerada através da mistura de ondas de várias frequências, possuindo apenas um único comprimento de onda. De acordo com Ferreira (2008) a coerência é definida como a capacidade de produzir efeitos de interferência entre dois pontos do campo, separados espacial ou temporalmente. A elevada coerência temporal resulta da seleção de modos numa cavidade ressonante, cujas frequências de ressonância estão limitadas a uma largura espectral estreita da transição laser. Por sua vez, a elevada direcionalidade do feixe imposta pela geometria da cavidade implica uma elevada coerência espacial. A amplificação de vários modos de oscilação, com diferentes frequências de ressonância com diferentes perfis espaciais, degrada a coerência do feixe emitido. Colimação é o processo de tornar paralelo a trajetória da partícula, fazendo com que tenha pouca divergência entre os raios de luz produzidos pelo laser e isso faz com que essa luz consiga propagar-se em grandes distâncias sem perder potência. Por fim, a intensidade se deve ao fato de ter uma alta energia concentrada em uma pequena unidade de área.

De acordo com Goloni, Temporão e Monteiro (2013), a norma IEC 60825-1:2007 classifica os equipamentos a laser com base no Limite de Emissão Acessível (AEL - *Acessible Emission Limit*), valor máximo de radiação ao laser ao qual um indivíduo pode ser exposto durante a operação do equipamento. O AEL, por sua vez, tem como base os níveis de Exposição Máxima Permissível (MPE - *Maximum Permissible Exposure*), que determina a exposição para uma pessoa sem lhe causar danos. Os níveis MPE são especificados para exposição ocular e dérmica, sendo uma função do comprimento de onda da radiação do laser, do tempo de exposição e da potência máxima emitida.

Em 2001, a norma internacional IEC 60825-1 e a norma europeia EN 60825-1 (idêntica à norma internacional) passaram por uma grande revisão. Nesta revisão, o sistema de classificação dos equipamentos a laser foi renovado. O *Quadro 1* apresenta um resumo dos riscos e do AEL de cada classe. Basicamente, a letra M das novas classes (1M e 2M) indica o uso de instrumentos ópticos magnificadores (lupa) e a letra R indica a redução de requisitos em relação à classe 3A original (Goloni; Temporão; Monteiro, 2013).

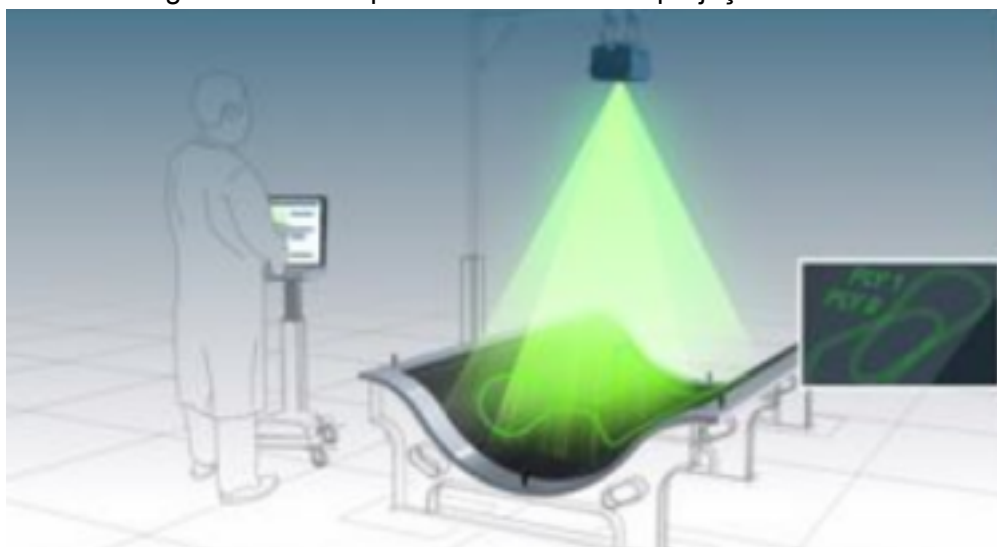
Quadro 1 – Riscos e AEL das Classes Laser

Classe	Riscos	Descrição	AEL
1	Não perigosos mesmo para longas exposições e com o uso de instrumentos ópticos de aumento	Potência muito baixa ou encapsulados	40 μ W
1M	Potencialmente perigosos aos olhos se observa dos por meio de instrumentos ópticos	Potência muito baixa, colimado e de diâmetro grande ou altamente divergente	40 μ M
2	Seguros para exposições não intencionais e observações não prolongadas (<0,25 s)	Potência baixa e visível	1mW
2M	Potencialmente perigosos aos olhos se observa dos por meio de instrumentos ópticos	Potência baixa, visível, colimado e de diâmetro grande ou altamente divergente	1mW
3R	Seguros quando manipulados com cuidado e potencialmente perigosos aos olhos se observa dos por meio de instrumentos ópticos	Potência baixa	200 μ W a 5 μ W
3B	Perigosos aos olhos nus quando observados diretamente (feixe e reflexões especulares)	Potência média	5mW a 500mW
4	Perigosos para a pele e olhos, inclusive na observação de reflexões difusas	Potência alta	>500mW

Fonte: A autora, 2022.

A potência necessária para a usabilidade do laser vai depender da aplicação. Muitas indústrias de manufatura estão buscando aumentar a velocidade de produção, flexibilidade e eficiência. Normalmente os métodos para aumentar a produtividade e a flexibilidade de um chão de fábrica envolve automação e o uso de computadores e micro controladores, como por exemplo os CLPs (Controlador lógico programável), ou até mesmo nas mais variadas formas como é o caso de CAD (*Computer-aided design*), CAM (*Computer-aided manufacturing*), etc (Ilchev *et al.*, 2020). Algumas indústrias usam a tecnologia do CAD em sistemas de projeção a laser (*Figura 11*) com o objetivo de substituir alguns dispositivos auxiliares e gabaritos ou até mesmo eliminar o uso de trenas, projetando informações relevantes e necessárias de forma acurada e de boa qualidade durante a manufatura do produto, aumentando assim o controle da qualidade do produto desenvolvido.

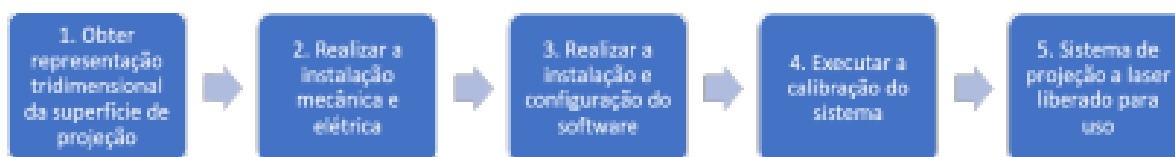
Figura 11 – Exemplo de um sistema de projeção a laser.



Fonte: Noções, 2022.

A implementação de um sistema a laser, de forma generalizada, pode ser ilustrado na *Figura 12* abaixo.

Figura 12 – Fluxograma da implementação de um sistema de projeção a laser.



Fonte: A autora, 2022.

A primeira etapa envolve a utilização de um método do ramo da metrologia chamado de metrologia 3D, cujo objetivo é representar tridimensionalmente a superfície de um objeto (em inglês utiliza-se o termo *laser tracking*). A segunda etapa está relacionada com a instalação das partes físicas de um sistema de projeção a laser, tais como: projetores, cuja função é realizar a projeção do arquivo desejado e deve apresentar linhas finas e com alta acuracidade, alvos que são pequenos dispositivos que possuem refletores para a calibração do sistema de projeção, estruturas mecânicas para fazer a fixação dos projetores e evitar o balanço da carga, cabos de alimentação, computadores, painéis elétricos, etc. A terceira etapa contempla a instalação e configuração do software que será utilizado para permitir que a primeira calibração do sistema seja feita (passo 4), bem como realizar a leitura, exportação e possíveis modificações do arquivo CAD e possibilitar a

interação entre o time operacional e o sistema, para manusear os arquivos de forma prática. Para o passo 4 ser bem sucedido é muito importante que os passos anteriores tenham sido executados de forma correta; a calibração básica consiste em utilizar os valores referência da superfície obtido durante o *laser tracking* para referenciar cada projetor com base na superfície de projeção, limitar a área de atuação dos projetores e garantir a acuracidade dos projetores. Por fim, após os passos anteriores terem sido seguidos, o sistema de projeção a laser está liberado para uso, basta apenas escolher o arquivo que deseja ser projetado e abrir utilizando a interface do software, que pode variar a depender do fabricante.

2.4.1 Metrologia 3D e sistemas de projeção a laser

A Metrologia tem como foco principal prover confiabilidade, credibilidade, universalidade e qualidade às medidas (Silva Neto, 2012) e isso é feito por meio da utilização de instrumentos de medição, como trenas, régua graduada, paquímetros, micrômetros, etc. Dentro deste ramo, a metrologia 3D tem ganhado cada vez mais espaço, principalmente no ambiente industrial, pois melhora a qualidade e a eficiência, além de prevenir potenciais acidentes, garantindo uma alta precisão métrica dos produtos manufaturados. A metrologia 3D é realizada com sensores tridimensionais para a obtenção de resultados altamente precisos. Com isso, uma máquina de medição de coordenadas consegue determinar dimensão, forma e posição de um objeto. A medição considera no cálculo vários pontos de sua própria superfície. O método consiste em determinar uma representação tridimensional da superfície de um objeto em um espaço de coordenadas. Para isso, a plataforma é equipada com um conjunto de diferentes sensores, usados para fazer medições em todas as direções. Assim, a posição de um ponto no espaço é definida, em coordenadas cartesianas, pelos valores relativos dos três eixos (x, y e z) em relação a um sistema de referência. Usando uma série de pontos, é possível construir detalhadamente os elementos geométricos. Dessa forma, o sistema gera um sinal, que é transferido para um computador e analisado por um software. Essa análise gera um conjunto de dados, atributos e informações sobre o objeto. Tais programas de medição foram desenvolvidos para simplificar o processo e reduzir o tempo de

medição, otimizando a inspeção.

2.4.2 Características dos projetores

As partes físicas do sistema de projeção a laser para um ambiente industrial devem ser capaz de operar com alta confiabilidade, serem robustas o suficiente para que possam funcionar sem paradas e, em algumas indústrias específicas, é preciso que sejam suscetível a poeiras, trepidações ou qualquer possível perturbação que pode ser gerada pelo meio Ilchev *et al.* (2020). Os projetores são os principais dispositivos e a tecnologia utilizada neles garante o sucesso do sistema. De acordo com Silva Neto (2012), um projetor a laser consiste em vários blocos de construção, que são apresentados individualmente abaixo:

- Bloco de fonte de alimentação: ele é conectado a todos os outros blocos e fornece as tensões de operação necessárias – na maioria das vezes +12V e $\pm 24V$;
- Bloco de feixe de laser: contém os diodos de laser. Ele também contém as placas eletrônicas (drivers de diodo laser) que regulam a corrente através dos diodos e, portanto, a intensidade do feixe, bem como os componentes ópticos – prismas e espelhos – que são necessários para combinar os feixes de laser vermelho, verde e azul em um único feixe;
- Bloco de scanner: possui duas unidades de galvanômetro posicionadas perpendicularmente entre si. As unidades do galvanômetro desviam o feixe de laser para cobrir uma superfície bidimensional e permitir a projeção de imagens 2D sequenciais. Tipicamente os galvanômetros são alimentados e controlados por um driver dedicado;
- Bloco de resfriamento: consiste em um ou mais dissipadores de calor, um controlador termoelétrico (TEC - Temperature-critical components) e/ou ventiladores de refrigeração, que empurram o calor gerado pelos diodos de laser e pelas unidades do galvanômetro fora do gabinete do projetor a laser;
- Bloco de controle: um ou mais controladores eletrônicos que estão

conectados aos drivers do laser, o driver do scanner e ao painel de controle do projetor a laser. Pode receber sinais de controle de um computador remoto.

2.4.3 Funcionalidades do software

O software utilizado em sistemas de projeção a laser possui como finalidade tornar possível a compatibilidade e interpretação dos arquivos que estão em formato CAD, para que estes possam ser utilizados para realizar a projeção. Os dados em CAD devem ser processados para torná-los adequados e confiáveis para projeção a laser e depois disso, deve ser passado para o firmware do projetor, que executará a função de projetar (Ilchev *et al.*, 2020).

A lista abaixo apresenta as funções genéricas que os softwares de um sistema de projeção a laser para o meio industrial possuem:

- Ler, modificar e exportar dados CAD;
- Gerar interface gráfica do usuário (GUI) que possua boa usabilidade e manuseio seguro;
- Realizar a calibração do sistema, com base nos valores de referência obtidos com o *laser tracking* da superfície;
- Permitir que todo o processo de produção seja documentado de forma consistente, armazenando os dados do trabalho.

Tipicamente os softwares são projetados para serem utilizados em um computador padrão e são operados utilizando mouse e teclado. Há alguns casos que permitem que sejam implementadas telas sensíveis ao toque para uma melhor interação, ou até mesmo controle remoto feito propriamente para tal função.

2.5 Indicadores utilizados para medir desempenho da empresa

As indústrias utilizam de alguns indicadores de desempenho, em inglês

Key-Performance Indicators (KPI), para medir o desempenho e do negócio, com foco em entender o que está funcionando e o que não está, e fazer as modificações necessárias para atingir os objetivos estabelecidos.

De acordo com Peng *et al.* (2007) existem três tipos de KPI:

- Indicador adiantado (*Leading indicator*): KPI que mede a atividade que tem um efeito significativo no desempenho futuro de uma empresa; esses indicadores são as causas raízes de um resultado positivo ou negativo.
- Indicador atrasado (*Lagging indicator*): mede a saída das atividades passadas. Em outras palavras, o que foi feito até o momento e quais foram os resultados gerados a partir dessas estratégias.
- Medida de diagnóstico (*Diagnostic measure*): um KPI que não é adiantado nem atrasado, mas sinaliza a saúde dos processos ou atividades atuais.

Ramo (10 principais, 2019) afirma que os indicadores de desempenho da indústria devem ser usados tanto para avaliar os processos atuais da empresa como para desenvolver estratégias mais eficientes para o futuro. Em geral, na indústria, os indicadores ajudam a mensurar a produtividade e a qualidade dos processos. Além disso, fornecem informações relevantes para identificar gargalos, ineficiências e desperdícios, contribuindo na melhora do desempenho.

Neste sentido, cada empresa deve determinar quais indicadores são mais relevantes para compreender o cenário interno. Em geral, para o ambiente industrial, existem 10 indicadores que são mais utilizados:

- Número de produtos produzidos: Essa métrica é usada para identificar a quantidade de itens produzidos em um determinado período. Este número pode ser usado para avaliar um setor específico, equipe ou turno;
- Produtividade homem/hora: O indicador acompanha a produtividade individual tanto no processo produtivo como em tarefas administrativas. Deve-se medir, por exemplo, a quantidade de produtos ou tarefas realizados em um intervalo pré-definido, como hora ou turno;

- Tempo Médio Para Reparo (MTTR): O cálculo do *Mean Time To Repair*, ou Tempo Médio Para Reparo, indica o tempo empregado para voltar à operação normal após uma falha. Ou seja, monitora o tempo de resposta das equipes e equipamentos;
- Tempo de inatividade: esta métrica indica o tempo que equipamentos e colaboradores ficaram inativos durante o turno. Assim, este índice identifica se as falhas são sucessivas e afetam o desempenho da indústria. Com isso, é possível calcular a produtividade e verificar o impacto da inatividade no lucro na empresa;
- Tempo Médio Entre Falhas (MTBF): O cálculo do *Mean Time Between Failures*, ou Tempo Médio Entre Falhas, revela o intervalo entre falhas operacionais. Essa métrica mostra se o maquinário está desgastado, se é insuficiente para o ritmo produtivo exigido e se é necessária a substituição de máquinas. Também pode indicar processos falhos que precisem de revisão;
- Horas trabalhadas na produção: Esse indicador revela quantas horas são necessárias para desempenhar as atividades em um determinado período. Caso o número de horas esteja elevado, pode ser necessário rever processos ou tornar as etapas mais eficientes para melhorar a lucratividade e o desempenho da indústria;
- Nível de utilização da capacidade instalada: Um dos principais indicadores de desempenho na indústria revela se o uso do maquinário e das instalações está pleno ou ocioso. Por exemplo, caso a linha de produção tenha capacidade para 10 mil itens mensais e está produzindo 7 mil, indica uma capacidade ociosa. Esse fato pode ocorrer devido a um problema operacional, como baixa produtividade ou queda no aproveitamento da capacidade do maquinário. Ou ainda, é possível que esta redução da produção seja temporária em decorrência de um planejamento estratégico;
- Custo total de produção: Este índice revela dados como o custo dos insumos, das horas máquina, das horas-homem, dos suprimentos e da depreciação

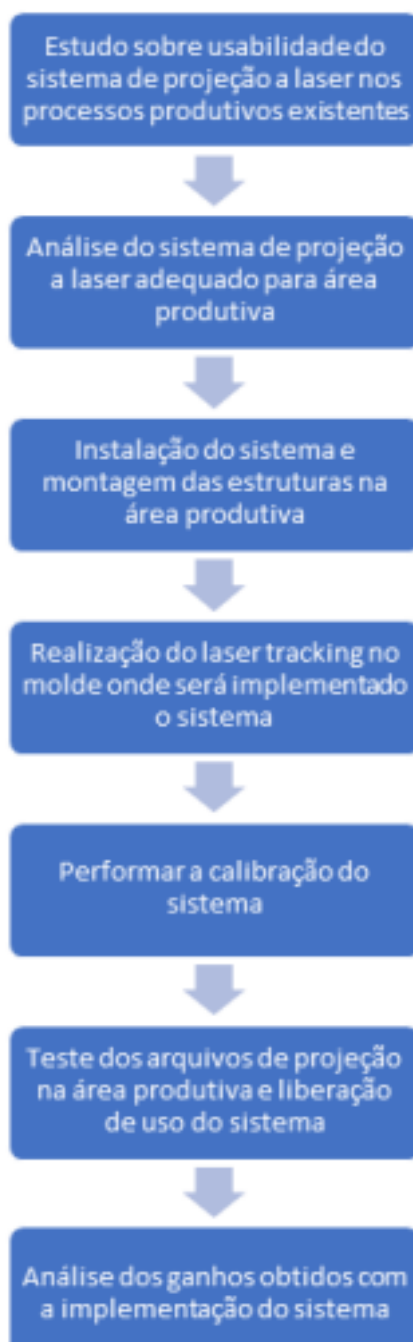
dos equipamentos. Tal valor pode ser monitorado por período, setor, linha de produção ou outros aspectos. Esse acompanhamento ajuda a identificar os custos operacionais e, portanto, identificar o lucro final após a venda;

- Giro do estoque: Essa métrica serve para verificar as entradas e saídas de produtos do estoque, avaliando quanto tempo uma mercadoria fica parada;
- Margem de contribuição e percentual de lucro: Esse indicador de desempenho na indústria revela o lucro do produto após a venda, descontando os custos de produção, armazenamento, logística etc. Por meio dessa métrica, a empresa pode identificar quais os produtos mais lucrativos e verificar o percentual de lucro de cada item.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, serão descritas as etapas consideradas para o desenvolvimento do sistema proposto. Foi elaborada uma sequência de etapas para a implementação do sistema na área produtiva. Na *Figura 13* é apresentado um diagrama de blocos com as etapas propostas e que serão descritas nas seções a seguir.

Figura 13 – Fluxograma das etapas utilizadas para implementação do sistema de projeção a laser.



Fonte: A autora, 2022

3.1 Estudo sobre usabilidade do sistema

O primeiro passo do processo consistiu em fazer um mapeamento dos processos existentes na manufatura de pás eólicas para observar os possíveis gargalos produtivos e onde o sistema de projeção a laser seria útil. A análise contemplou os seguintes pontos:

- Etapas do processo: foram listadas todas as etapas dos processos existentes para produzir uma pá eólica;
- Descrição da atividade: Após acompanhamento na área produtiva, as etapas listadas foram descritas com detalhes;
- Instrumento utilizado: O objetivo desse ponto é analisar quais os instrumentos/equipamentos que são utilizados para realizar cada processo, para que assim pudesse ser analisado se alguns deles poderiam ser futuramente substituídos pelo sistema de projeção a laser;
- Tempo de execução da atividade: Apesar de terem atividades acontecendo em paralelo dentro de uma área produtiva, existe um tempo padrão definido pela empresa para realizar cada atividade. Essa informação foi analisada na área produtiva para cada etapa do processo.

3.2 Análise do sistema adequado para a área produtiva

Para a análise do sistema adequado para a área produtiva foram levados em consideração os seguintes pontos:

- Analisando a norma IEC 60825-1, foi observado que se deve utilizar lasers na classe 3B ou inferior, devido aos riscos envolvendo danos a pele e/ou aos olhos;
- Foi feito uma análise na área onde o sistema de projeção iria ser instalado para definir posições onde as estruturas seriam montadas e, com isso, ter

uma estimativa da altura onde os projetores estariam montados, pois com base nisso é possível definir se a potência do laser atenderia ao processo;

- O número de projetores necessários e seu arranjo específico é determinado pelo tamanho da pá que será produzida e o layout da instalação. Uma vez esses pontos definidos, é possível utilizar um software de modelagem para concluir sobre onde os projetores devem ser alocados de forma que tenha alcance suficiente para as projeções acontecerem com qualidade.

Ao finalizar os pontos gerais necessários para o funcionamento do sistema, foi feito um levantamento dos itens necessários para o funcionamento devido do projeto e iniciou a busca de fornecedores que contemplavam os componentes que atendessem aos requisitos da empresa.

3.3 Instalação física e elétrica do sistema

Para a instalação do sistema, alguns requisitos são necessários para garantir o bom funcionamento e segurança na área instalada:

- A estrutura base que será utilizada para posicionar os projetores foi projetada para suportar o peso de cada projetor e manter uma estrutura estável;
- O local onde os projetores serão instalados é livre de vibrações e protegido da radiação solar direta;
- O raio de projeção do projetor a laser não interfere com outras fontes de luz;
- Não há componentes ao redor dos projetores que tenham interferência no raio de projeção;
- A tensão de serviço indicada na placa dos projetores corresponde à tensão de rede local.

Uma vez todas as premissas acima sendo atendidas, os seguintes passos são seguidos para a instalação:

- Montagem do projetor a laser na placa de montagem: Os projetores a laser são posicionados nas posições definidas previamente, seguindo os requisitos de ângulo, altura e rotação especificados de acordo com a necessidade específica da área de projeção;
- Instalação dos alvos: Os alvos utilizados para a calibração do sistema são posicionados nas suas respectivas posições e alinhados com o projetor a laser;
- Montagem da caixa de distribuição: A caixa de distribuição, onde é realizada a conexão para cabos elétricos, os projetores a lasers e conexão para o cabo ethernet do PC industrial é montada na área industrial e toda a parte elétrica do sistema é estabelecido;
- Configuração do computador: Nesta etapa é realizado uma configuração do computador que será utilizado para servir de interface entre o time operacional e o sistema de projeção a laser e permitir a operação de todo o sistema. É nesse momento que o software específico do sistema de projeção é instalado e toda a estrutura de redes de computadores é estabelecida, de forma a garantir um bom funcionamento do laser.

3.4 Realização do *laser tracking*

A etapa de *laser tracking* é dividida em dois momentos:

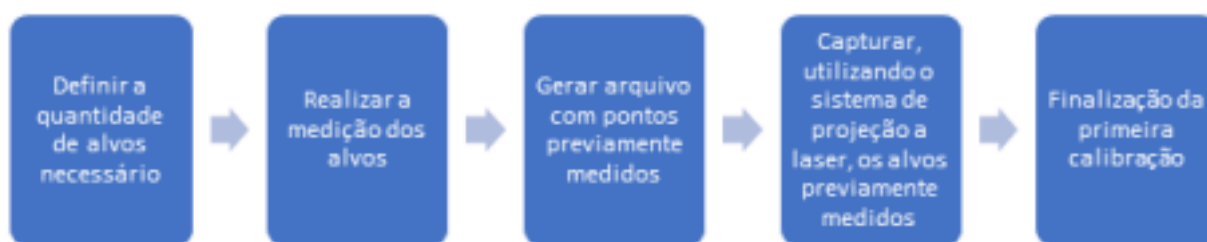
- *Laser tracking* da superfície onde o sistema de projeção será utilizado: Nesse momento, utilizando um rastreador a laser, um feixe de laser auto reflexivo é emitido e ao fazer contato com a superfície do molde em questão, é retornado para o controlador a posição tridimensional da superfície. Essa etapa é crucial pois é a referência utilizada para realizar a calibração do sistema e garantir acuracidade;
- *Laser tracking* dos alvos: Uma vez a superfície onde será projetada ter sido

mapeada, é obtido o sistema de coordenadas que os alvos estão posicionados utilizando como referência as medições do primeiro passo. Para essa etapa é gerado um arquivo no formato .txt, .csv ou .xlsx e serão utilizadas para realizar a calibração do sistema.

3.5 Execução da calibração do sistema do sistema

O arquivo de calibração possui as coordenadas x, y e z dos alvos que estão posicionados na superfície onde será feito a projeção a laser. O diagrama em blocos na *Figura 14* ilustra o passo a passo realizado para realizar a primeira calibração do sistema.

Figura 14 – Etapas da primeira calibração



Fonte: A autora, 2022

O primeiro passo consiste na definição da quantidade de alvos que será utilizado no sistema. Essa definição quantitativa é feita por meio de um software de modelagem, onde são dados os inputs referentes ao tipo de superfície utilizada para projeção e a quantidade de projetores necessários e o software informa quantos alvos serão necessários e as suas respectivas posições. Uma vez conhecidas as posições onde os alvos devem estar posicionados, a medição dos alvos é realizada. As posições dos alvos podem ser medidas utilizando os seguintes meios: Fita métrica, fotogrametria e *laser tracking*.

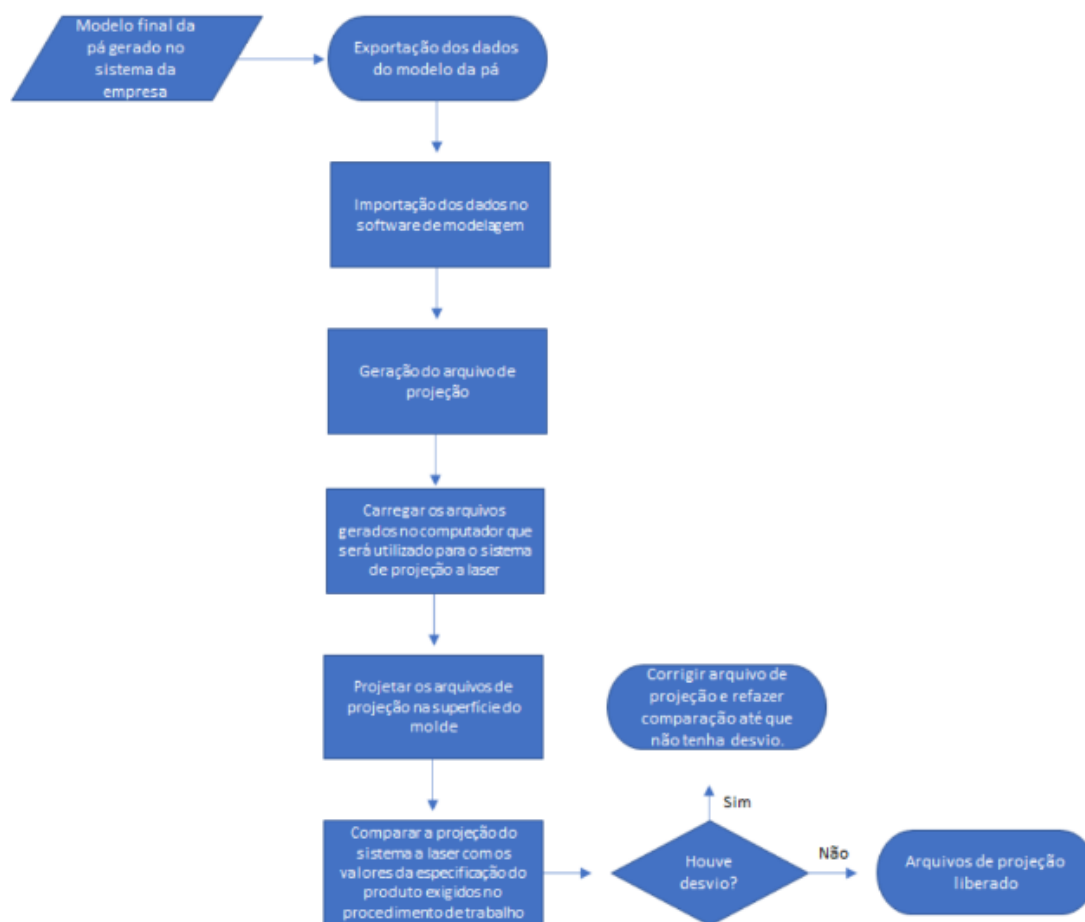
Após as coordenadas x, y e z dos alvos terem sido capturadas, é gerado um arquivo com os valores medidos e esses os valores são colocados no software específico utilizado para o sistema de projeção a laser, para que sejam utilizados como valores de referência para calibrações futuras. Antes de iniciar a utilização o

sistema de projeção, é feito uma nova captura dos alvos, dessa vez utilizando o software específico de projeção a laser. Nessa etapa o projetor a laser projeta a luz sobre o alvo e a luz é refletida pelos alvos e o reflexo, por sua vez, é reconhecida pelos fotodiodos dos projetores e, com base no reflexo da luz é determinada a posição do alvo em relação ao projetor a laser. Utilizando esses resultados, são calculados automaticamente as coordenadas x, y e z do projetor a laser no sistema de coordenadas do software de projeção.

3.6 Teste dos arquivos de projeção na área produtiva e análise dos ganhos obtidos

A etapa de teste dos arquivos de projeção na área produtiva inicia com a geração dos arquivos de projeção que serão utilizados pelo time operacional. Tais arquivos são gerados utilizando um software de modelagem 3D, onde é construído a geometria da superfície requisitada seguindo as definições do produto. Após a modelagem, é gerado um arquivo com o perfil da superfície disponível e esse arquivo pode ser aberto no sistema de projeção a laser disponível. Uma vez com os arquivos de projeções disponíveis, será realizado a projeção na superfície do molde e serão coletadas medições dos pontos projetados para que posteriormente seja feito uma comparação entre a projeção e o valor especificado nos procedimentos de trabalho. O fluxo abaixo, na *Figura 15*, representa o passo a passo de criação e validação dos arquivos de projeção.

Figura 15 – Passo a passo de validação dos arquivos de projeção.



Fonte: A autora, 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Mapeamento do processo antes da implementação do sistema

Após um acompanhamento no chão de fábrica, foi realizado um mapeamento do processo antes de realizar a implementação do sistema de projeção a laser. As análises foram feitas apenas para o processo de layup, infusão e fechamento.

Para o processo de processo de layup, os resultados do mapeamento podem ser observados nos *Quadros 2 e 3*.

Quadro 2 – Mapeamento do processo de layup.

Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade de pessoas necessárias	Tempo atual de execução (min)
1	Marcação da fita de mascaramento	A marcação da fita de mascaramento, cujo objetivo é proteger a área durante a pintura do molde, é a primeira etapa realizada	Trena	6	10
2	Aplicação da fita de mascaramento nas bordas do molde	A fita de mascaramento é aplicada nas posições marcadas	Não aplicável	6	15
3	Aplicação das fibras iniciais	As primeiras fibras são aplicadas do molde seguindo as posições descritas no procedimento de trabalho	Trena	12	40
4	Marcação da linha de construção do molde	É realizado a marcação da linha de construção do molde antes de iniciar a aplicação da fibra	Trena	1	5
5	Marcação da linha de construção da longarina	É realizado a marcação da linha de construção da longarina antes de iniciar a aplicação da fibra	Trena	2	15

Continua

Continuação

Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade de pessoas necessárias	Tempo atual de execução (min)
6	Marcação da linha de construção da alma	É realizado a marcação da linha de construção da alma antes de iniciar a aplicação da fibra	Trena	1	5
7	Aplicação de fibra no molde antes do material do núcleo	As fibras pré cortadas são aplicadas no molde seguindo a sequência, as posições longitudinais e transversais do layup descrito no procedimento de trabalho	Trena	18	80

Fonte: A autora, 2022.

Quadro 3 – Continuação do mapeamento do processo de layup.

Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade de pessoas necessárias	Tempo atual de execução (min)
8	Marcação da linha de construção do molde para aplicar a longarina	É realizado novamente a marcação em todo o comprimento do molde para ter a referência de posicionamento da longarina.	Trena	2	10
9	Marcação da área de aplicação da longarina	A posição inicial e final da longarina é marcada no molde, bem como as posições na transversal que ele deve estar posicionado.	Trena	2	15
10	Posicionamento dos guias para a longarina	São posicionados guias ao longo de todo o molde em posições específicas para auxiliar durante o posicionamento da longarina	Guias de metal	5	10

Continua

Continuação

Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade de pessoas necessárias	Tempo atual de execução (min)
11	Aplicação da longarina	Posicionamento da longarina no molde, seguindo as marcações feitas anteriormente	Ponte rolante	10	30
12	Aplicação do material do núcleo	O material do núcleo já está cortado no tamanho necessário e é aplicado ao lado da longarina. Nenhuma marcação é necessária nesse momento.	Não aplicável	18	80
13	Verificação do material do núcleo	Uma vez o material do núcleo posicionado, é verificado se as distâncias para a borda do molde estão conforme o especificado no procedimento de trabalho.	Trena	2	15
14	Aplicação de fibra no molde antes do material do núcleo	As fibras pré cortadas são aplicadas no molde seguindo a sequência, as posições longitudinais e transversais do layup.	Trena	18	120
15	Marcação da área do perfil de silicone	É necessário realizar a marcação da área onde um perfil de silicone será posicionado	Trena	2	5
16	Aplicação do perfil de silicone	Após a área ter sido marcada, é realizada a aplicação seguindo os pontos marcados.	Trena	2	15
17	Realização de corte de fibra para evitar defeito	É realizado a marcação da área onde precisa ser feito um corte da fibra de vidro em algumas posições específicas para evitar defeito no processo.	Trena	3	10

Fonte: A autora, 2022.

Para o processo de infusão e de preparação do kit de infusão, a análise antes da implementação do projeto é listada no *Quadro 4*.

Quadro 4 – Mapeamento do processo de infusão.

Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade de pessoas necessárias	Tempo atual de execução (min)
1	Marcação da linha de construção do molde	É realizado a marcação da linha de construção do molde para referenciar o posicionamento do kit de infusão.	Trena	1	10
2	Aplicação do kit de infusão	Kit de infusão é posicionado no molde seguindo as marcações realizadas no passo 1. Nesse momento é aplicado um único kit de infusão por vez.	Não aplicável	6	30
3	Marcação de área de cortes do kit de infusão	É feito marcações da área de corte do kit de infusão em todo o comprimento do molde de acordo com o procedimento de trabalho. Essa marcação é necessária para assegurar que o corte será feito na posição correta e a infusão ocorrerá conforme planejado	Trena	4	10
4	Aplicação do plástico de vácuo	O plástico de vácuo é aplicado em todo o comprimento do molde	Não aplicável	10	20

Fonte: A autora, 2022.

O processo de fechamento (contempla também a preparação para o fechamento) é o penúltimo processo durante a moldagem da pá, é executado em 9 passos, que estão descritos no *Quadro 5*.

Quadro 5 – Mapeamento do processo de fechamento.

Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade de pessoas necessárias	Tempo atual de execução (min)
1	Preparação e Reparo da casca	Lixamento da casca para ativação de superfície da casca e reparos dos defeitos gerados nos processos anteriores.	Lixadeira	15	180
2	Colocação do gabarito guia da alma	Somente após o lixamento e liberação da casca, é posicionado um gabarito para marcação da posição dos apoiadores das almas.	Gabarito metálico	6	20
3	Colagem dos apoiadores das almas	Utilizando cola, os apoiadores das almas são posicionados em todas as posições definidas.	Não aplicável	2	20
4	Remoção dos gabaritos do guia da alma	Retirada dos gabaritos e armazenamento do local adequado	Não aplicável	6	20
5	Marcação da lista de espuma	A cada 500mm da borda da pá é realizado uma marcação da posição em que uma lista de espuma, item utilizado para eliminar defeito de cola, deve tá posicionada	Trena	2	20
6	Colagem da lista de espuma	É colado fita dupla face em toda a distância que a lista de espuma deve tá posicionada e em seguida a lista de espuma é colada na dupla face	Não aplicável	2	20

Continua

Continuação

Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade de pessoas necessárias	Tempo atual de execução (min)
7	Montagem do sistema SPDA da pá	Na região da ponta da casca, são marcadas as posições de algumas espumas que compõe o sistema SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas) da pá.	Trena	1	20
8	Marcação do pino de junção	Com o auxílio da ferramenta metálica de apoio, o pino de junção é removido do berço e posicionado na casca na posição final de aplicação para servir como guia. Utilizando piloto, é marcado todo o contorno da peça e em seguida o pino de junção é removido	Ponte rolante e ferramenta guia	4	15
9	Marcação da linha de cola do pino de junção	Utilizando piloto e trena são marcadas as linhas de cola definidas em procedimento de trabalho dentro do contorno do pino de junção	Trena	2	30

Fonte: A autora, 2022.

4.2 Componentes utilizados e arranjo do sistema

Para definir os componentes utilizados foi realizada uma pesquisa de mercado para analisar os fornecedores existentes e se o material que eles possuem atendem aos requisitos necessários para o processo produtivo.

O sistema final é formado por:

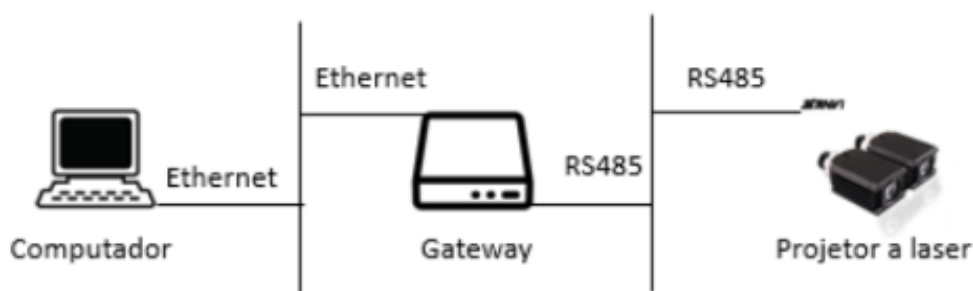
- 16 projetores a laser (8 por molde) com 30mW de potência instalados a uma

altura média de 12m do molde;

- 16 estruturas de montagem, utilizadas para realizar a montagem dos projetores no teto;
- 52 alvos refletores por molde, totalizando 104 alvos;
- 1 desktop, 1 teclado e um mouse;
- Um armário de distribuição utilizado para suportar o painel elétrico e o desktop, teclado e mouse;
- 2 controles remotos para possibilitar uma maneira alternativa de passar os arquivos de projeção pelo time operacional, bem como controlar a direção dos alvos durante a calibração.

A quantidade de projetores, altura e quantidade de alvos foram definidos com base em resultados obtidos nas simulações realizadas no software CATIA. O arranjo entre o computador e os projetores foi realizado seguindo o esquema ilustrado na *Figura 16*.

Figura 16 – Arquitetura de rede utilizada.



Fonte: A autora, 2022.

O projetor a laser transmite os dados através do RS485 usando um protocolo chamado syncronet, já configurado pelo próprio fornecedor. O gateway faz com que a conexão RS485- Ethernet aconteça e através disso é realizada a comunicação entre os projetores e o software do sistema que está instalado no computador. O gateway tem o papel de traduzir os dados que estão sendo enviados no RS485 para a ethernet e vice versa. Nessa etapa do processo acontece uma comunicação

bilateral, onde o controle do sistema e dos dados de projeção são transferidos do software para os projetores e informações sobre o status do laser são enviados do projetor para o computador. Toda a etapa de configuração de endereços IPs são realizados no software do sistema, disponibilizado pelo fornecedor. Após todos os componentes instalados e devidamente configurado, foi realizado o laser tracking do molde e dos pontos onde os alvos foram posicionados para que a primeira calibração fosse executada.

4.3 Laser tracking e calibração

Utilizando um rastreador a laser de alta tecnologia foi realizado o laser tracking do molde e dos pontos onde os alvos foram posicionados com o objetivo de mapear toda a superfície do molde. Os valores obtidos com o rastreador foram coletados e um arquivo .txt, que posteriormente será utilizado para calibrar o sistema, foi gerado com esses pontos. Por razões de confidencialidade industrial, não é possível apresentar o arquivo .txt gerado, porém a *Figura 17* apresenta, de maneira generalista, o formato do arquivo.

Figura 17 – Formato do arquivo gerado para calibração.

```

52
Alvo1      x      y      z
Alvo2      x      y      z
Alvo3      x      y      z
Alvo4      x      y      z
.
.
.
Alvo52     x      y      z

```

Fonte: A autora, 2022.

O arquivo .txt é adicionado no software existente para o sistema de projeção a laser para realizar a primeira calibração do sistema. Durante a calibração, cada

projektor emite uma luz que é refletida pelo alvo novamente para o projetor e durante esse processo, o projetor a laser faz o mapeamento de cada alvo individualmente. Com os valores obtidos pelo projetor, o software calcula o desvio existente entre os pontos inseridos no arquivo .txt (obtidos com o laser tracking) e os valores medidos pelo projetor. Quando o desvio medido é menor do que 2mm em cada projetor, o sistema emite um aviso indicando que o projetor foi calibrado com sucesso e pode ser utilizado. Uma vez o sistema liberado para uso, os arquivos de projeções foram gerados utilizando o software de modelagem CATIA e inseridos no software do sistema de projeção a laser para ser executado na produção.

4.4 Processo de produção de pás eólicas utilizando o sistema a laser

O Quadro 6 apresenta as mudanças realizadas após a implementação do sistema de projeção a laser para o processo de layup.

Quadro 6 – Mapeamento do processo de layup após a implementação do sistema.

Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade e de pessoas necessária	Tempo atual de execução (min)
1	Aplicação da fita de mascaramento nas bordas do molde	A fita de mascaramento é aplicada na área projetada	Sistema de projeção a laser	6	15
2	Aplicação das fibras iniciais	As primeiras fibras são aplicadas no molde seguindo as posições descritas no procedimento de trabalho	Sistema de projeção a laser	12	40
3	Aplicação de fibra no molde antes do material do núcleo	O sistema de projeção projeta as linhas de construções necessárias e as fibras pré cortadas são aplicadas no molde seguindo as localizações descritas no procedimento de trabalho	Trena e sistema de projeção a laser	18	80

Continua

Continuação

Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade de pessoas necessárias	Tempo atual de execução (min)
4	Posicionamento dos guias para a longarina	O sistema de projeção projeta a área onde a longarina deve ser aplicada e os guias para a aplicação da longarina são colocados nas posições requisitadas no procedimento de trabalho.	Guia de metal e sistema de projeção a laser	5	10
5	Aplicação da longarina	O sistema de projeção a laser projeta a área onde a longarina deve ser aplicada e é iniciado o posicionamento da longarina com o auxílio de uma ponte rolante	Sistema de projeção a laser e ponte rolante	10	30
6	Aplicação do material do núcleo	O material do núcleo já está cortado no tamanho necessário e é aplicado ao lado da longarina e seguindo as marcações projetadas pelo sistema de projeção a laser	Sistema de projeção a laser.	18	80
7	Aplicação de fibra no molde antes do material do núcleo	O sistema de projeção projeta as linhas de construções necessárias e as fibras pré cortadas são aplicadas no molde seguindo as localizações descritas no procedimento de trabalho	Trena e sistema de projeção a laser	18	120
8	Aplicação do perfil de silicone	O sistema de projeção a laser projeta a área do perfil de silicone e é realizado a aplicação	Sistema de projeção a laser	2	15
9	Realização de corte de fibra para evitar defeito	O sistema de projeção a laser projeta a área onde deve ser feito um corte na fibra de vidro.	Sistema de projeção a laser	3	10

Fonte: A autora, 2022.

O processo de preparação para a infusão após o sistema pode ser visto no *Quadro 7*.

Quadro 7 – Mapeamento do processo de infusão após a implementação do sistema.

Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade de pessoas necessária	Tempo atual de execução (min)
1	Aplicação do kit de infusão	Kit de infusão é posicionado no molde utilizando a linha de construção projetada pelo sistema a laser, sendo possível aplicar cinco kits de infusão por vez	Sistema de projeção a laser	6	20
2	Marcação de área de cortes do kit de infusão	O sistema de projeção a laser projeta a área de corte do kit de infusão em todo o comprimento do molde de acordo com o procedimento de trabalho e o corte é realizado	Sistema de projeção a laser	4	10
3	Aplicação do plástico de vácuo	O plástico de vácuo é aplicado em todo o comprimento do molde	Não aplicável	10	20

Fonte: A autora, 2022.

Para o processo de fechamento, o *Quadro 8* ilustra o novo fluxo do processo.

Quadro 8 – Mapeamento do processo de fechamento após a implementação do sistema.

Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade de pessoas necessária	Tempo atual de execução (min)
1	Preparação e Reparo da casca	Lixamento da casca para ativação de superfície da casca e reparos dos defeitos gerados nos processos anteriores. Porém, após o sistema a laser, os reparos são feitos em paralelo enquanto a casca está sendo preparada para o fechamento	Lixadeira	15	180

Continua

Continuação

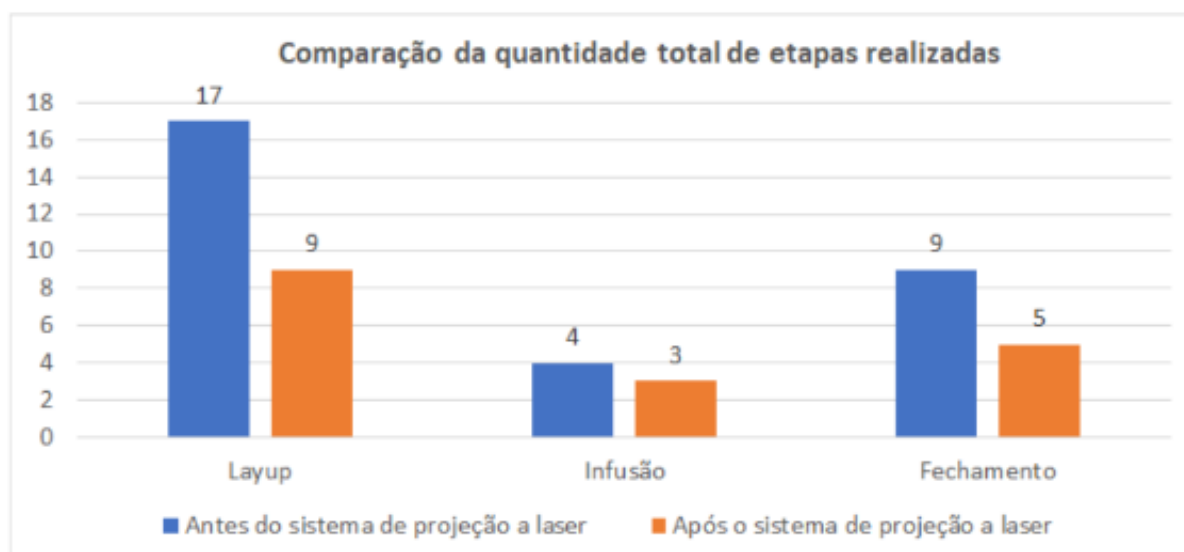
Número da etapa	Etapa do processo	Descrição da atividade	Instrumento ou equipamento utilizado	Quantidade de pessoas necessárias	Tempo atual de execução (min)
2	Colagem dos apoiadores da alma	O sistema de projeção projeta a localização dos apoiadores da alma e utilizando cola, eles são posicionados em todas as posições	Sistema de projeção a laser	2	20
3	Colagem da lista de espuma	O sistema de projeção a laser projeta a área onde a lista de espuma deve ser aplicada e a aplicação é realizada	Sistema de projeção a laser	2	20
4	Aplicação de cola	Utilizando o sistema de projeção a laser, é realizado a aplicação de cola seguindo as projeções na casca, seguindo o contorno projetado	Sistema de projeção a laser	2	15
5	Aplicação do pino de junção	Com o auxílio de uma ponte rolante o pino de junção é aplicado na casca.	Ponte rolante	1	5

Fonte: A autora, 2022.

4.5 Análise de ganhos

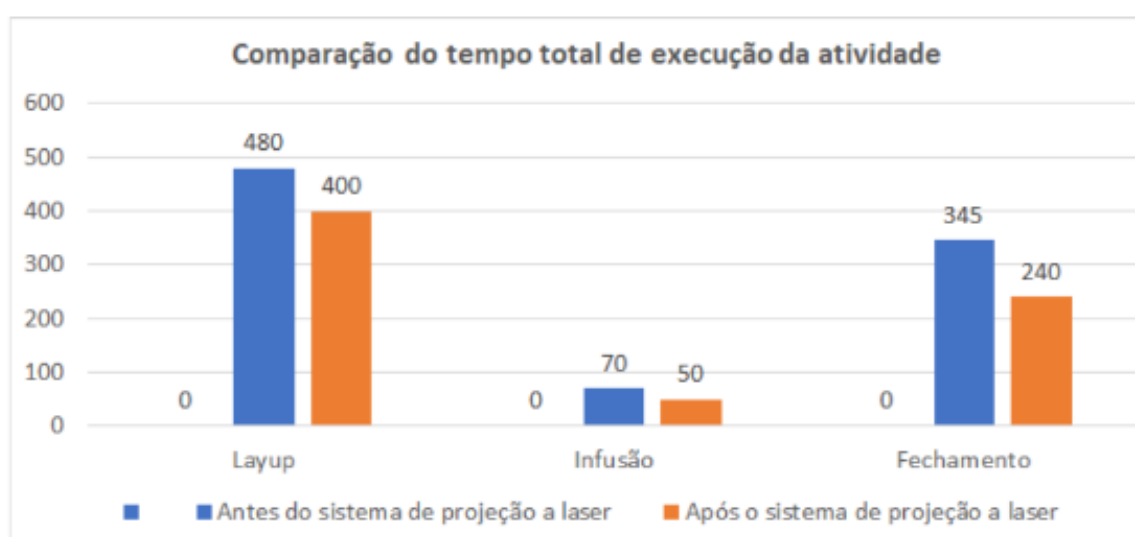
Durante o mapeamento do processo após a implementação do sistema foram pontuadas as melhorias implementadas. As *Figuras 18, 19 e 20* apresentam os dados comparativos relacionados a Quantidade de Etapas e Tempo de Execução da atividade obtidos antes da implementação do sistema e projeção a laser e depois para o processo de layup, infusão e fechamento.

Figura 18 – Comparação da quantidade de etapas.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 19 – Comparação do tempo de atividade.



Fonte: A autora, 2022.

Na *Figura 18* é possível observar a redução da quantidade de etapas pois com o sistema de projeção a laser muitas atividades puderam ser paralelizadas e muitas marcações realizadas utilizando trena e/ou gabaritos metálicos foram eliminadas.

Já na *Figura 19* a redução do tempo total de execução da atividade foi a consequência a redução da quantidade de etapas e da redução da quantidade de pessoas necessárias para realizar o processo, pois com o sistema de projeção disponível os operadores finalizavam as suas atividades e assim é possível

redirecioná-los para uma outra atividade, reduzindo assim a ociosidade do time operacional.

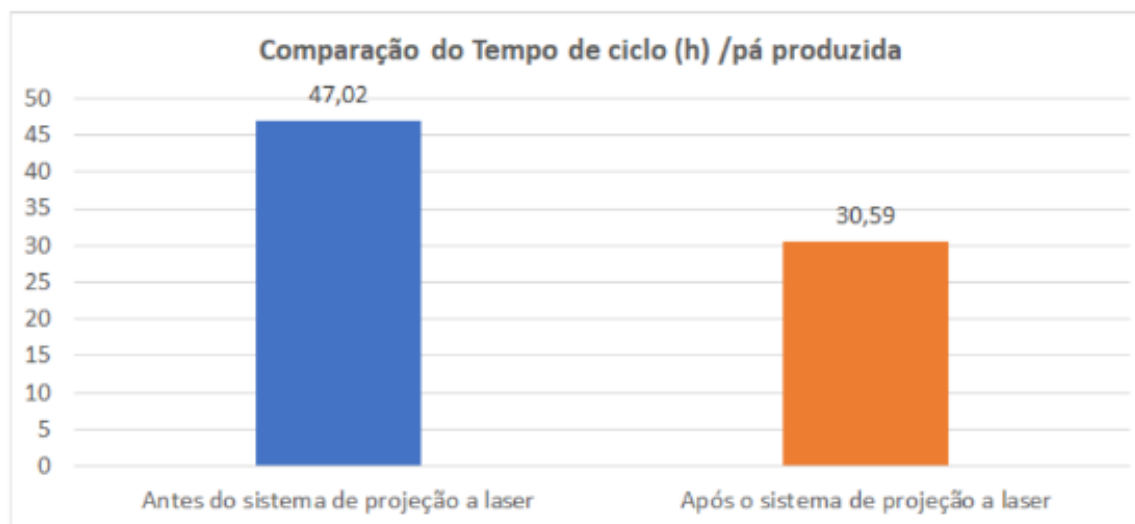
Os ganhos estimados com a implementação do sistema podem ser refletidos nos principais indicadores da indústria, que são eles: número de produtos produzidos, produtividade hora homem, tempo de inatividade e horas trabalhadas na produção. Como é possível observar, foi estimado que a quantidade de etapas para realizar o processo fosse reduzido em 56%, pois grande parte das marcações que antes eram necessárias durante o processo foram eliminadas para dar vez ao sistema de projeção a laser. Além disso, a redução de etapas diminui o tempo de inatividade e aumenta a produtividade hora-homem, pois muitas vezes alguns operadores precisavam esperar as marcações serem realizadas no passo anterior para iniciar a sua atividade. Outro indicador impactado é o número de produtos produzidos, pois a utilização do sistema diminuiu os erros manuais de marcação que causavam retrabalho e teve um ganho de 205 minutos por peça produzida, com isso, a empresa é capaz de entregar a meta mensal e aumentar o número de produtos produzidos.

4.6 Ganhos reais

Um parâmetro utilizado dentro da indústria onde foi implementado o sistema de projeção a laser é o tempo de ciclo para produzir a pá. Com base nesses valores, foi feita uma análise comparando o cenário do tempo de ciclo médio por pá antes do sistema de projeção a laser e após o sistema. A *Figura 20* apresenta o resultado.

É fundamental destacar que a redução de 16.43h não se deve exclusivamente à implementação do sistema de projeção. Durante esse momento de transição, houve também a implementação de projetos de melhoria contínua na empresa focado em otimizar o processo produtivo, tendo ações diretas nas reduções de defeito e padronizações. Todas essas ações, juntamente com a implementação do sistema de projeção a laser, trouxe um ganho significativo na redução de tempo de ciclo por pá produzida.

Figura 20 – Análise do ganho real



Fonte: A autora, 2022.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposto descrever o passo a passo da implementação de um sistema de projeção a laser visando a melhoria na eficiência e segurança durante um processo produtivo de pás eólicas, com foco em melhorar os indicadores de desempenho da empresa e, como consequência, fazer com que a empresa ganhe vantagem competitiva no mercado. Como resultados deste trabalho, foi observado que o sistema de projeção a laser aparece como uma boa alternativa para substituir o uso de trenas e gabaritos durante o processo produtivo de pás eólicas, pois podem reduzir em até 43% o número de etapas durante o processo produtivo, impactando em uma redução de aproximadamente 30 % do tempo de ciclo dos três principais processos de produção de pás eólicas. As reduções afetam positivamente os indicadores de desempenho utilizado nas indústrias, pois diminui o tempo de inatividade, aumenta a produtividade hora-homem e o número de produtos produzidos.

REFERÊNCIAS

- 10 PRINCIPAIS indicadores de desempenho na indústria. **Ramo**. Gestão Industrial. 02 out. 2019. Disponível em: <https://ramo.com.br/gestao-industrial/indicadores-de-desempenho-na-industria/>. Acesso em: 27 ago. 2022.
- ALBANESI, Alejandro E. *et al.* Simultaneous ply-order, ply-number and ply-drop optimization of laminate wind turbine blades using the inverse finite element method. **Composite Structures**, v. 184, p. 894–903, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.051>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- BERALDO, Heloisa C. **Contribuições à análise dinâmica de torres de turbinas eólicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas e Geotécnica) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2019.tde-17102019-150859>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- BURTON, Tony. *et al.* **Wind energy handbook**. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2011.
- CUNHA, Felipe B. F. *et al.* Renewable energy planning policy for the reduction of poverty in brazil: lessons from juazeiro. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 7, p. 9792–9810, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00857-0>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- DELLEZZOPOLLES JÚNIOR, Cyrio F. **Análise dinâmica de torres de energia eólica**. 2011. 98f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2011. Disponível em: <https://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M11-6A-Cyrio-Junior.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- DOWDEN, John. **The theory of laser materials processing**: Heat and Mass Transfer in Modern Technology, Springer, 2009.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2022**. EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 27 ago. 2022.
- FERREIRA, Flávio P. G. F. **Análise De Coerência De Feixes Laser Com óptica Difractiva e difusão Dinâmica**. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade do Minho, Escola de Ciências, Braga, Portugal, 2008. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/9131>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- GLOBAL Electricity Review 2022. **EMBER**. 2022. Disponível em: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/#supporting-material-downloads>. Acesso em: 21 ago. 2022.

GOLONI, Carolina; TEMPORÃO, Guilherme; MONTEIRO, Elisabeth. Metrological reliability of optical coherence tomography in biomedical applications. *In: IOP PUBLISHING. Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2013. v. 459, n. 1, p. 012064.

HAU, Erich; RENOARD, Horst von. **Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics**. [S.l.]: Springer New York, 2003.

ILCHEV, S. *et al.* Computer-aided laser projection system for flexible manufacturing. *In: 2020. IEEE. 10th International Conference on Intelligent Systems (IS)*. IEEE, 2020. Varna. **Anais** [...] Varna, Bulgária, 2020. p. 568–573. ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IS48319.2020.9199938>. Acesso em: 20 nov. 2024.

JENSEN, Mølholt. *et al.*. **Wind turbine blades**. The Blade Handbook, A shared lingo for the future of wind. Edition 2019. Handbook (124 p.), Kirt x Thomsen . Bladena. [S.l.]: CORTIR, 2019. ISBN 978-87-971709-0-8. Disponível em: https://www.bladena.com/uploads/8/7/3/7/87379536/cortir_handbook_2019.pdf. Acesso em: 27 ago. 2022.

KOEFOED, Michael S. **Modeling and simulation of the vartm process for wind turbine blades**. Industrial Ph. D. dissertation, Citeseer, p. 5–10, 2003.

MARINHO, Thayc. **Os 12 macro-processos de manufatura de pás eólicas**. 2021. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/os-12-macro-processos-de-manufatura-das-p%C3%A1s-e%C3%B3licas-thayc-marinho/>. Acesso em: 15 jul. 2022.

MASTERSON, Victoria. Wind and solar generated 10% of global electricity in 2021 - a world first. **World Economic Forum**. 8 abr. 2022. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2022/04/wind-solar-electricity-global-energy/>. Acesso em: 12 out. 2024.

MISHNAEVSKY JR, Leon. *et al.* Materials for wind turbine blades: An overview. **Materials, MDPI**, v. 10, n. 11, p. 1285, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma10111285>. Acesso em: 20 nov. 2024.

NAYAK, Rajkishore; PADHYE, Rajiv. The use of laser in garment manufacturing: an overview. **Fashion and textiles**, v. 3, n. 1, p. 1–16, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40691-016-0057-x>. Acesso em: 20 nov. 2024.

NOÇÕES básicas sobre projetores laser. FRASIER E RAAB ORTHOTICS - FARO. Artigo. 2022. Disponível em: <https://www.faro.com/pt-BR/Resource-Library/Article/understanding-laser-projectors>. Acesso em: 15 jul. 2022.

OLABI, Abdul G. *et al.* A review on failure modes of wind turbine components. **Energies, MDPI**, v. 14, n. 17, p. 5241, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14175241>. Acesso em: 20 nov. 2024.

PADMANATHAN, Kasinathan. *et al.* Conceptual framework of antecedents to trends on permanent magnet synchronous generators for wind energy conversion systems. **Energies, MDPI**, v. 12, n. 13, p. 2616, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12132616>. Acesso em: 20 nov. 2024.

PENG, Wei. *et al.* A semi-automatic system with an iterative learning method for discovering the leading indicators in business processes. *In*: DDDM2007, International Workshop on Domain Driven Data Mining. Fortaleza, 2007. **Anais [...]** San Jose, California, USA [S.l.: s.n.], 2007. p. 33–42. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=50a0cd36ad9cd6770d3b1e62e907d6e285dea1ed>. Acesso em: 20 nov. 2024.

RICCI, Ricardo Pedroso. **Desenvolvimento de critérios para seleção de adesivos utilizados na fabricação de pás de turbinas eólicas**. 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências, Bauru, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/99677>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SILVA NETO, João C. **Metrologia e controle dimensional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

TONG, Wei. **Wind power generation and wind turbine design**. [S.l.]: WIT press, 2010.

WISER, Ryan. *et al.* **Wind Energy**. *In*: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, 2011. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/abs/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/wind-energy/DB4E9F2CBC0B78D9F8A7F9F7CAB54C91#>. Acesso em: 03 dez. 2024.