



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Garanhuns

Bacharelado em Engenharia Elétrica

MARIA EDUARDA MORAIS FLORÊNCIO

**DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EM MÁQUINAS DE INFUSÃO
NA PRODUÇÃO DE PÁS EÓLICAS**

Garanhuns/PE

2023

MARIA EDUARDA MORAIS FLORÊNCIO

**DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EM MÁQUINAS DE INFUSÃO
NA PRODUÇÃO DE PÁS EÓLICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Wilker Victor da Silva Azevêdo.

Garanhuns/PE

2023

F633d

Florêncio, Maria Eduarda Morais.

Diagnóstico e análise de confiabilidade em máquinas de infusão na produção de pás eólicas / Maria Eduarda Morais Florêncio ; orientador Wilker Victor da Silva Azevêdo, 2023.

101 f. : il.

Orientador: Wilker Victor da Silva Azevêdo.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus Garanhuns. Coordenação do Curso Superior em Engenharia. Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2023.

1. Energia eólica. 2. Pás eólicas – Fabricação. 3. Máquinas de infusão - Análise. 4. Máquinas elétricas de indução. I. Título.

CDD 621.312136

Andréa Maria Lidington Lins –CRB4/868

DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EM MÁQUINAS DE INFUSÃO NA PRODUÇÃO DE PÁS EÓLICAS

Trabalho aprovado. Garanhuns, 15 de dezembro de 2023.

Professor Orientador: Wilker Victor da Silva Azevêdo, Me.

Avaliador Interno: Márcio Severino da Silva, Dr.

Avaliador Interno: Manoel Alves Cordeiro Neto, Esp.

Avaliador Externo: Graziela Fernanda Oliveira Monteiro, Esp.

Avaliador Externo: Lindemberg Figueiredo da Silva, Esp.

Garanhuns/PE

2023

Dedico este trabalho às minhas queridas avós, Severina Maria e Maria Olinda. Embora não estejam presentes para testemunhar o encerramento desta jornada, espero que lá do céu sintam o orgulho que este momento carrega. A saudade é imensa, mas a gratidão por todo amor incondicional e apoio é eterna.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por concretizar o sonho que cultivava desde a infância de me tornar Engenheira Eletricista. Hoje percebo que isso sempre foi parte de Seu propósito para mim.

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Ednairan e José Carlos, por todos os ensinamentos, amor, compreensão e apoio ao longo de toda a minha vida. À minha tia Vera, agradeço por ser meu porto seguro nos momentos em que mais precisei.

Ao meu noivo, Walyson, que esteve presente em todos os momentos, mesmo nas horas de minha ausência, torcendo pelo meu sucesso e cuidando de mim com amor e generosidade todos os dias.

Ao professor Wilker, que sempre me inspirou e enxergou em mim um potencial que eu mesma desconhecia. Aprender com você durante esses anos foi um dos maiores privilégios da minha jornada acadêmica.

De maneira especial, dedico minha gratidão ao meu supervisor de estágio, Lindemberg, por me introduzir ao fascinante mundo da confiabilidade e por guiar-me neste trabalho. Agradeço, igualmente, ao engenheiro Gabriel e aos técnicos Ailton e Josemar pelo apoio inestimável nos últimos meses.

Aos meus amigos de graduação e estágio: Eduarda, Dinilton, Eduardo, Mariana, Hemilly, Caio, Natália e Raquel, agradeço por tornarem esse período mais feliz e leve.

E a todos os colegas que compartilharam comigo os últimos dois anos nos parques eólicos e na fábrica de pás eólicas, meu sincero agradecimento.

"A persistência é o caminho do êxito."

Charlie Chaplin

RESUMO

À medida que os impactos da intervenção humana no meio ambiente crescem, a exploração sustentável dos recursos naturais torna-se uma prioridade global. Com foco na energia eólica, crucial para a matriz energética global, a pesquisa concentra-se nas máquinas de infusão. Essas desempenham papel crucial na fabricação de pás eólicas, evitando defeitos, assegurando qualidade e minimizando ciclos perdidos. Em um cenário de competição crescente, redução de custos e aumento da demanda, a aplicação de ferramentas de engenharia de manutenção e confiabilidade torna-se essencial para o desempenho eficaz de sistemas industriais. Diante disso, foi realizado um estudo abrangente da confiabilidade de seis máquinas de infusão, identificando as máquinas menos confiáveis. Uma análise detalhada identificou o alarme de fluxo de peróxido muito baixo como principal causador, relacionado à intensa vibração durante a rampa de aceleração das bombas. A implementação da medida corretiva, aumentando o amortecimento da bomba do catalisador, resultou em melhorias expressivas, reduzindo picos de vibração em até 92% e elevando a confiabilidade em até 60,49% na máquina de infusão.

Palavras-chave: Energia Eólica. Pás Eólicas. Máquinas de Infusão. Confiabilidade. Análise de Vibração.

ABSTRACT

As the impacts of human intervention on the environment grow, sustainable exploration of natural resources becomes a global priority. With a focus on wind energy, crucial for the global energy matrix, the research centers on infusion machines. These play a crucial role in manufacturing wind turbine blades, preventing defects, ensuring quality, and minimizing lost cycles. In a scenario of increasing competition, cost reduction, and rising demand, the application of maintenance and reliability engineering tools becomes essential for the effective performance of industrial systems. Considering this, a comprehensive study of the reliability of six infusion machines was conducted, identifying the least reliable machines. A detailed analysis pinpointed the alarm of peroxide flow to low as the main cause, related to intense vibration during the ramp-up of the pumps. The implementation of a corrective measure, increasing the damping of the catalyst pump, resulted in significant improvements, reducing vibration peaks by up to 92% and increasing reliability by up to 60.49% in the infusion machine.

Keywords: Wind Energy. Wind Turbine Blades. Infusion Machine. Reliability. Vibration Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Evolução da composição da capacidade instalada total por fonte.	15
Figura 2.1 - Evolução da geração de energia eólica, nuclear e biomassa.	19
Figura 2.2 - Variação da composição da oferta existente e contratada ao longo dos anos de 2021, 2026 e 2031.	20
Figura 2.3 - Estrutura de aerogerador de eixo horizontal.	21
Figura 2.4 - Diferentes modelos de turbinas eólicas.	23
Figura 2.5 - Variação da massa através da área de varredura A.	25
Figura 2.6 - Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.	25
Figura 2.7 - Modelo simplificado da turbina do tipo Pérsia.	26
Figura 2.8 - Definição da força de sustentação e arrasto em um elemento de lâmina.	28
Figura 2.9 - Coeficientes CL e CD em função do ângulo de ataque (α).	29
Figura 2.10 - Fluxo laminar e fluxo turbulento.	30
Figura 2.11 - Sistema de um DOF com uma única massa.	31
Figura 2.12 - Sistema de um DOF com duas massas.	31
Figura 2.13 - Vibração em uma máquina rotativa.	35
Figura 3.1 - Cascas downwind e upwind de uma pá eólica.	37
Figura 3.2 - Linha de corda de uma pá eólica.	38
Figura 3.3 - Seção transversal de uma pá eólica.	38
Figura 3.4 - Esquema do fluxo macro de um processo de fabricação de pás eólicas.	39
Figura 3.5 - Linha do tempo da fabricação de uma pá eólica.	42
Figura 3.6 - Posicionamento de camadas de fibra de vidro em uma casca de pá eólica.	43
Figura 3.7 - Representação esquemática do processo de infusão a vácuo (VIP).	45
Figura 3.8 - Desenho esquemático do processo de infusão.	46
Figura 3.9 - Pressão durante o processo de infusão.	47
Figura 3.10 - Controle por realimentação da saída.	48
Figura 3.11 - Esquema de ação de controle feedforward.	51
Figura 3.12 - Evolução da manutenção.	54
Figura 3.13 - Relação da confiabilidade e manutenibilidade com a disponibilidade de máquinas.	56
Figura 4.1 - Metodologia geral do estudo.	58
Figura 4.2 - Diagrama de força da máquina de infusão.	59
Figura 4.3 - Sistema de controle da máquina de infusão.	60
Figura 4.4 - Diagrama de regulação de pressão.	61
Figura 4.5 - Relação da pressão no molde e a proporção de mistura.	61
Figura 4.6 - Controle PID da bomba de resina.	62
Figura 4.7 - Controle PID da bomba de peróxido.	62
Figura 4.8 - Lógica para cálculo de setpoints para alarmes de nível 1 em Ladder.	64
Figura 4.9 - Alarme 1: Alta taxa de mistura em Ladder.	65
Figura 4.10 - Diagrama do Alarme 1: Alta taxa de mistura.	65

Figura 4.11 - Alarme 2: Baixa taxa de mistura em Ladder.	66
Figura 4.12 - Diagrama do Alarme 2: Baixa taxa de mistura.	66
Figura 4.13 - Alarme 3: Alta pressão no manifold em Ladder.	67
Figura 4.14 - Diagrama do alarme 3: Alta pressão no manifold.	67
Figura 4.15 - Alarme 4: Fluxo de Peróxido Muito Baixo em Ladder	68
Figura 4.16 - Diagrama do Alarme 4: Fluxo de peróxido muito baixo.	69
Figura 4.17 - Pontos de medição de vibração.	74
Figura 5.1 - Confiabilidade do pré-diagnóstico.	75
Figura 5.2 - Recorrência dos alarmes de infusão em um período de 30 dias (pré-diagnóstico).	76
Figura 5.3 – Duração em segundos dos alarmes de infusão em um período de 30 dias (pré-diagnóstico).	76
Figura 5.4 - Recorrência do alarme 4 por IM (pré-diagnóstico).	77
Figura 5.5 - Fluxo de resina e peróxido sem ocorrência do alarme 4 (IM 6).	78
Figura 5.6 - Fluxo de resina e peróxido com ocorrência do alarme 4 (IM 1).	79
Figura 5.7 - Fluxo de resina e peróxido com ocorrência do alarme 4 (IM 2).	80
Figura 5.8 – Velocidade de vibração na bomba de resina (IM1).	84
Figura 5.9 - Velocidade de vibração na bomba de peróxido (IM1).	84
Figura 5.10 - Velocidade de vibração no fluxímetro de peróxido (IM1).	84
Figura 5.11 - Velocidade de vibração na bomba de resina (IM2).	89
Figura 5.12 - Velocidade de vibração na bomba de peróxido (IM2).	89
Figura 5.13 - Velocidade de vibração no fluxímetro de peróxido (IM2).	89
Figura 5.14 - Aceleração de vibração na bomba de peróxido antes e após a ação corretiva (IM1).	91
Figura 5.15 - Aceleração de vibração no fluxímetro de peróxido antes e após a ação corretiva (IM1).	91
Figura 5.16 - Aceleração de vibração na bomba de peróxido antes e após a ação corretiva (IM2).	92
Figura 5.17 - Aceleração de vibração no fluxímetro de peróxido antes e após a ação corretiva (IM2).	92
Figura 5.18 - Confiabilidade da IM1 e IM2 no pré e pós-diagnóstico.	93
Figura 5.19 - Recorrência do alarme 4 na IM1 e IM2 no pré e pós-diagnóstico.	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 - Especificações técnica da máquina de infusão.....	60
Quadro 4.2 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 1 (IM1).	70
Quadro 4.3 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 2 (IM2).	70
Quadro 4.4 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 3 (IM3).	71
Quadro 4.5 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 4 (IM4).	71
Quadro 4.6 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 5 (IM5).	72
Quadro 4.7 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 6 (IM6).	72
Quadro 5.1 - Confiabilidade do pré-diagnóstico.	75
Quadro 5.2 - Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração na bomba de resina da IM1.....	81
Quadro 5.3 - Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração na bomba de peróxido da IM1.....	82
Quadro 5.4 - Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração no fluxímetro de peróxido da IM1.....	83
Quadro 5.5 – Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração na bomba de resina da IM2.....	86
Quadro 5.6 - Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração na bomba de peróxido da IM2.....	87
Quadro 5.7 – Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração no fluxímetro de peróxido da IM2.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS

CLP	Controlador Lógico Programável
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
DOF	<i>Degrees Of Freedom</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IHM	Interface Homem-Máquina
IM	<i>Infusion Machine</i>
IV	<i>Injection Valves</i>
LE	<i>Leading Edge</i>
MDI	Modelo de Decisão de Investimentos
MTBF	<i>Mean Time to Repair</i>
PD	Controlador Proporcional Derivativo
PDE	Plano Decenal de Energia
PI	Controlador Proporcional Integral
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PT	<i>Pressure Transmitter</i>
PV	<i>Process Variable</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SP	<i>Setpoint</i>
TBF	<i>Time Between Failure</i>
TE	<i>Trailing Edge</i>
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
TTF	<i>Time to Failure</i>
TTR	<i>Time to Repair</i>
VIP	<i>Vacuum Infusion Process</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	ELEMENTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE AEROGERADORES	18
2.1	Energia Eólica	18
2.2	Estrutura de um Aerogerador	21
2.3	Conversão de Energia Cinética em Energia Mecânica	23
2.3.1	Força de Arrasto	26
2.3.2	Força de Sustentação	28
2.4	Vibração Mecânica	30
2.4.1	Massa	32
2.4.2	Rigidez	32
2.4.3	Amortecimento	33
2.4.4	Sinal de Vibração	34
3	CONTROLE E CONFIABILIDADE NA FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS	36
3.1	Estrutura de Pás Eólicas	36
3.1.1	Processo de Fabricação de Pás Eólicas	39
3.1.1.1	Processo de Infusão	44
3.2	Controle PID	48
3.2.1	Controle PID Feedforward	51
3.3	Confiabilidade de Máquinas Industriais	52
3.3.1	Tipos de Manutenção	53
3.3.2	Distribuição Exponencial	55
4	MATERIAIS E MÉTODOS	58
4.1	Máquina de Infusão	58
4.2	Alarmes de Infusão	63
4.3	Dados de Confiabilidade	69
4.4	Análise de Vibração	73
5	RESULTADOS E ANÁLISES	75
5.1	Pré-Diagnóstico	75
5.1.1	Confiabilidade	75
5.1.2	Investigação do Alarme de Fluxo de Peróxido Muito Baixo	77
5.1.3	Medição de Vibração	81

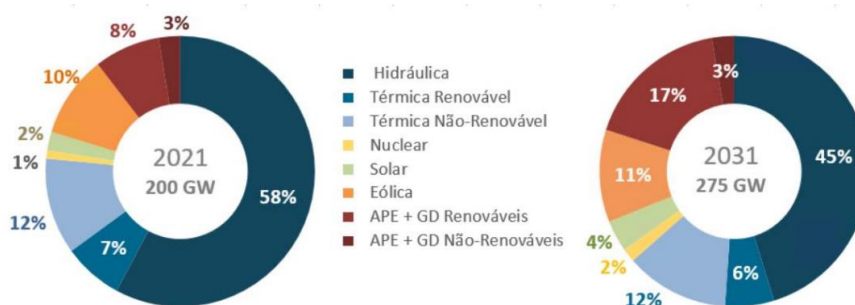
5.1.3.1	Máquina de Infusão 1	81
5.1.3.2	Máquina de Infusão 2	85
5.2	Pós-Diagnóstico	90
5.2.1	Medição de Vibração	90
5.2.1.1	Máquina de Infusão 1	90
5.2.1.2	Máquina de Infusão 2	92
5.2.2	Confiabilidade	93
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
7	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

À medida que os efeitos da intervenção humana no meio ambiente se tornam mais evidentes, a importância de uma exploração racional dos recursos naturais ganha destaque. Nesse cenário, Jacobi (2006) destaca que a temática da sustentabilidade adquiriu relevância significativa, sendo abordada com seriedade por nações em todo o mundo ao longo dos anos. Essa crescente preocupação com as questões ambientais vem estimulando a realização de pesquisas de desenvolvimento tecnológico que visam atingir uma sustentabilidade ambiental. Por isso, as fontes renováveis de energia terão participação cada vez mais relevante na matriz energética global nas próximas décadas (AZEVEDO, 2016).

De acordo com Wisser (2019), a energia eólica é reconhecida como uma fonte energética capaz de reduzir de maneira significativa as emissões de gases de efeito estufa. E o Plano Decenal de Energia (PDE) para 2031 reforça que as fontes de energia eólica e solar fotovoltaica têm se mostrado economicamente muito competitivas comparadas às demais tecnologias candidatas a expansão (PDE, 2022). Ao longo do horizonte decenal, as estimativas para a geração de eletricidade se mantêm com o nível de renovabilidade de 84%, com a redução na participação hidrelétrica sendo compensada pelo crescimento da capacidade instalada das fontes eólica e solar (Figura 1.1).

Figura 1.1 - Evolução da composição da capacidade instalada total por fonte.



Fonte: PDE (2022).

Ainda de acordo com o PDE, quando analisado o período após o horizonte decenal, entre 2032 e 2036, devido ao término da entrada de expansão para atendimento a Lei 14.182, o Modelo de Decisão de Investimentos (MDI) volta a indicar

expressivo montante de oferta eólica e fotovoltaica, totalizando 17.500 MW nesse período, ou seja, mais que o dobro do montante indicado no horizonte decenal.

No âmbito tratado, a implementação de novos parques eólicos no Brasil demanda a produção em larga escala de pás eólicas, frequentemente solicitadas sob encomenda, com prazos e custos estabelecidos em contratos previamente assinados. Nisto, conforme destacado por Alencar (2014), a gestão eficiente dos prazos de entrega, aliada à minimização dos custos de produção, representa um objetivo que requer monitoramento diário e se configura como uma prioridade essencial.

O processo de fabricação de uma pá eólica envolve dois macroprocessos: o processo de moldagem e o pós-moldagem. No processo de moldagem, destaca-se a etapa de infusão, na qual as fibras de vidro são impregnadas com resina e um agente catalisador, sendo guiadas por vácuo. A produção bem-sucedida de uma peça utilizando o processo de infusão de resina a vácuo apresenta desafios consideráveis, especialmente devido à geometria complexa (MUSHADAD, 2012). Prever o avanço do fluxo através do molde é uma tarefa difícil, requerendo controle rigoroso de diversas variáveis, como temperatura da resina e catalisador, temperatura ambiente, pressão, fluxo, densidade, entre outras.

As máquinas de infusão (*Infusion Machines* - IMs) desempenham papel central no processo de infusão, supervisionando todas as variáveis associadas ao procedimento, controlando a abertura e fechamento de válvulas, e ativando alarmes conforme necessário. O desempenho eficiente das máquinas evita defeitos de infusão, como a formação de fibras secas ou a presença exclusiva de resina ou peróxido no laminado. Além disso, assegura a minimização de ciclos perdidos devido a atrasos ou à necessidade de intervenção por parte de operadores ou técnicos de manutenção.

A crescente concorrência de mercado, redução de gastos e desperdícios e aumento da demanda, tem gerado a necessidade cada vez maior da aplicação de ferramentas ofertadas pela engenharia de manutenção e confiabilidade para alcançar desempenho eficaz de sistemas industriais (BELINELLI, 2015). Nesse contexto, destaca-se a importância do estudo de confiabilidade das máquinas de infusão de pás eólicas, as quais desempenham um papel crucial na garantia da qualidade do produto final. A análise visa não apenas identificar possíveis anomalias, mas também apontar

claramente os pontos de aprimoramento nas máquinas, visando otimizar sua eficiência e contribuir para a excelência na produção.

No cerne tratado, o objetivo geral deste trabalho consiste em realizar uma análise abrangente da confiabilidade de seis máquinas de infusão, examinando minuciosamente os alarmes mais recorrentes durante o processo. Em específico, aspectos físicos e eletromecânicos da geração eólica e de aerogeradores, além de um cenário prospectivo do setor nos próximos anos foram examinados, apresentados no segundo capítulo. Elementos estruturais relacionados à fabricação das pás eólicas, com destaque ao processo de infusão, aplicação de controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID) são abordados no terceiro capítulo, assim como confiabilidade e manutenção.

Materiais e métodos são apresentados no quarto capítulo, em que se destacam detalhes da máquina, materiais constituintes e alarmes, parâmetros, diagramas de força e controle. No quinto capítulo discorre-se sobre os principais resultados do trabalho. Foi explorada a possível influência da vibração nas bombas de resina e catalisador na ativação de alarmes, avaliando seu papel na baixa confiabilidade do sistema. Posteriormente, foi implementado uma ação corretiva com o intuito de reduzir a vibração e, conseqüentemente, os alarmes que impactam negativamente o processo de infusão. Antecipa-se que tais intervenções promoveram significativo aumento da confiabilidade das IMs e do processo como um todo.

2 ELEMENTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE AEROGERADORES

O presente capítulo traça um panorama abrangente da evolução da energia eólica em escala global, com foco especial no contexto brasileiro. Além disso, oferece uma visão prospectiva do cenário energético nas próximas décadas, destacando o papel e a contribuição prevista da energia eólica. São abordados os aspectos físicos inerentes à estrutura dos aerogeradores, bem como o funcionamento desses dispositivos na conversão da energia cinética em energia mecânica.

Outro ponto de destaque neste capítulo é a discussão acerca da vibração de máquinas, explorando de que forma a vibração pode impactar um sistema. São discutidas as variáveis de medição mais relevantes nesse contexto, proporcionando uma compreensão aprofundada dos fatores que influenciam o comportamento vibracional de máquinas.

2.1 Energia Eólica

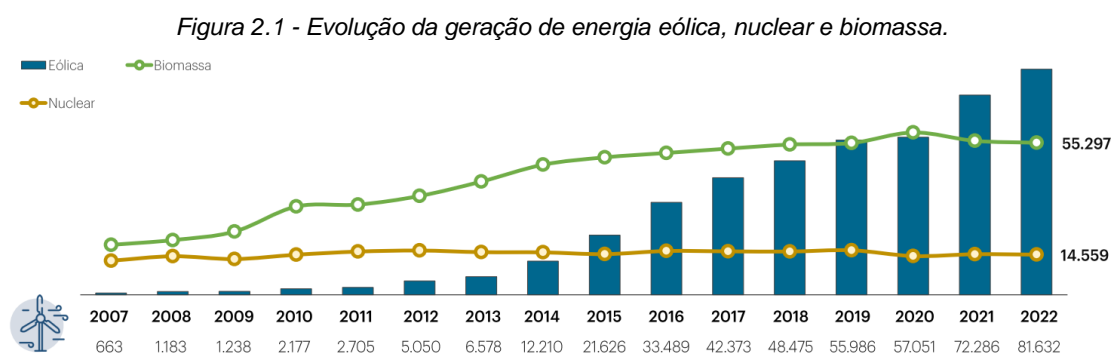
O encerramento do século XIX testemunhou o advento da Revolução Industrial, um período marcado por profundas mudanças que acarretaram o declínio do uso tradicional da energia eólica. A mencionada revolução promoveu uma transformação radical nos processos de produção, impulsionando o emprego generalizado de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, tais como carvão mineral, petróleo e gás natural. Essas fontes se destacaram pela sua notável densidade energética, flexibilidade de uso e facilidade de transporte, características que as tornaram amplamente adotadas naquela época (ALVES, 2017). Simultaneamente, o progresso das redes elétricas estimulou pesquisas e investigações com o propósito de adaptar os moinhos de vento para a geração de eletricidade. Esses estudos pioneiros culminaram no desenvolvimento do primeiro aerogerador, concebido pelo americano Charles Brush, em 1888 (DUTRA, 2008). Diante desse contexto histórico, percebe-se a transição significativa nas fontes de energia e a emergência de uma abordagem mais voltada para a eletricidade, prenunciando a ascensão da energia eólica como uma alternativa crucial para o fornecimento de energia no futuro.

Foi somente após aproximadamente um século desde a introdução dos primeiros aerogeradores que se tornou possível o desenvolvimento dessas estruturas em escala

comercial. Esse avanço foi impulsionado principalmente pelo crescente interesse na tecnologia eólica, motivado pelas complicações resultantes da crise do petróleo na década de 1970. Vale destacar que, durante esse período, houve um notável aumento no número de turbinas eólicas instaladas em todo o mundo, passando de apenas 150 unidades em 1981 para impressionantes 16.000 em 1985 (BURTON *et al*, 2001; GNOATTO, 2017). Assim, esse período marcou não apenas um avanço tecnológico, mas também um ponto de inflexão na aceitação e adoção em larga escala da energia eólica como uma fonte viável e eficiente de geração. A crescente conscientização sobre as questões ambientais e a busca por alternativas sustentáveis consolidaram a energia eólica como uma peça fundamental na matriz energética global.

De acordo com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica - CRESESB (2008), em 1976, o Brasil realizou o processamento de dados anemométricos coletados nos aeroportos do país por meio do Instituto de Atividades Espaciais e do Centro Técnico Espacial. Essas análises revelaram médias anuais de velocidade do vento em torno de 4 m/s, medidas a uma altura de 10 metros. Esses resultados já indicavam a viabilidade técnica de turbinas de pequeno porte para sistemas isolados, além de identificar as regiões nordeste e o arquipélago de Fernando de Noronha como as mais promissoras nesse aspecto.

No entanto, a utilização dos recursos eólicos para a geração de energia elétrica no Brasil é um fenômeno relativamente recente. Foi no final da penúltima década que se observou um crescimento exponencial nesse setor. Esse crescimento expressivo resultou em um aumento significativo na geração anual de energia eólica, saltando de 663 GWh em 2007 para 81.632 GWh em 2022 (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2023). Apresentando um crescimento de 51,9% nos últimos 5 anos, a geração eólica consolida a liderança quando comparada com a evolução das fontes de energia nuclear e biomassa (Figura 2.1).

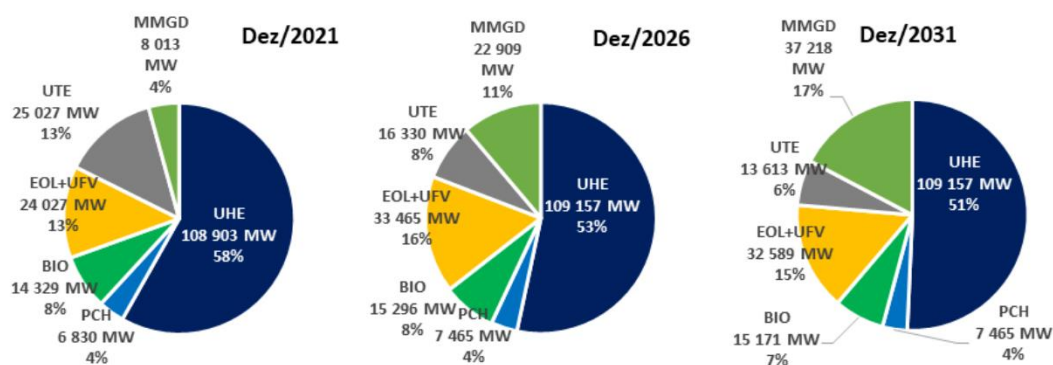


Fonte: EPE (2023).

O exercício de expansão denominado "Rodada Livre", conforme proposto no PDE 2031 (PDE, 2022), confirma uma tendência contínua observada em ciclos anteriores. Esse cenário evidencia a crescente predominância das fontes de energia renovável, especificamente a eólica e a solar fotovoltaica, como principais recursos para o suprimento de energia, sendo complementadas por usinas termelétricas, quando necessário.

No cenário de referência do PDE 2031 (Figura 2.2), percebe-se que a parcela absoluta de energia hidrelétrica na matriz energética permanece praticamente constante. Entretanto, nota-se um crescimento significativo nas fontes de energia eólica e solar fotovoltaica de geração centralizada, as quais, combinadas, contribuirão com um adicional de cerca de 9 GW na capacidade instalada, entre dezembro de 2021 e o término de 2031.

Figura 2.2 - Variação da composição da oferta existente e contratada ao longo dos anos de 2021, 2026 e 2031.



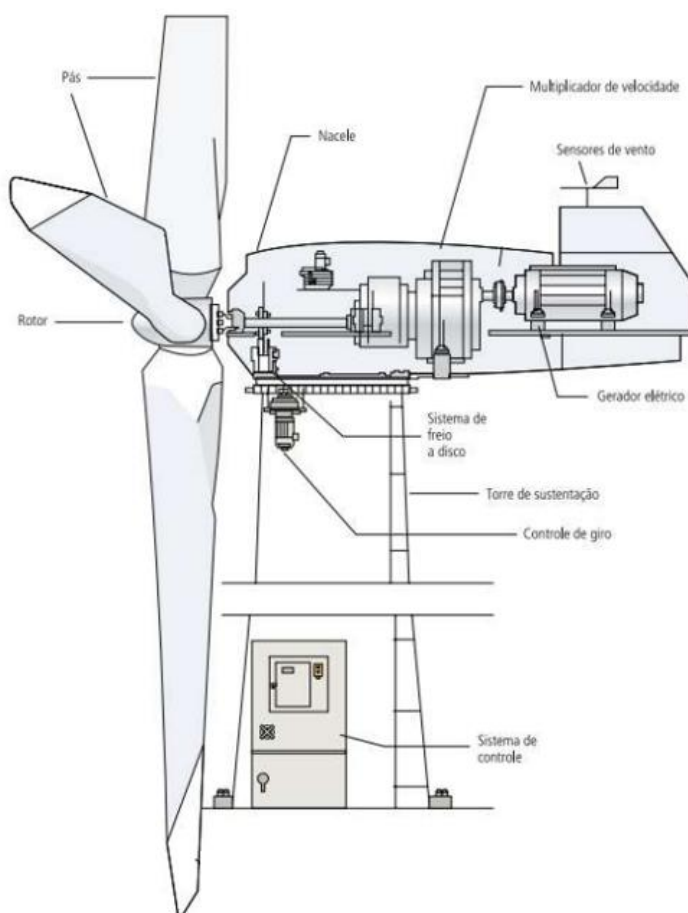
Fonte: PDE (2022).

Conforme esperado, o aumento da demanda por parques eólicos tem impulsionado de forma significativa a produção de pás eólicas. Para atender a essa demanda, observa-se um aumento na capacidade de produção, bem como avanços tecnológicos na sua fabricação, visando aprimorar a eficiência e o desempenho das turbinas. Adicionalmente, conforme destacado por Simas e Pacca (2013), a produção de pás eólicas é a atividade que apresenta o mais elevado índice de empregabilidade por capacidade instalada entre os diversos componentes de um aerogerador, tanto em termos de empregos diretos quanto indiretos. Além disso, a intensa concorrência entre fabricantes tem impulsionado a inovação no setor, com investimentos em pesquisa e desenvolvimento para criar pás mais duráveis, leves e eficientes. A seguir é apresentada em detalhes a estrutura do aerogerador, corroborando para a compreensão do seu funcionamento.

2.2 Estrutura de um Aerogerador

Os parques eólicos são diversificados pelo modelo e número de aerogeradores, impactando diretamente na potência gerada. Esses modelos também variam de acordo com o ambiente em que serão instalados, na terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*), contudo, a estrutura básica de funcionamento permanece a mesma para ambos. Os principais componentes de um aerogerador de eixo horizontal são mostrados na Figura 2.3 e descritos em seguida (MARQUES, 2004).

Figura 2.3 - Estrutura de aerogerador de eixo horizontal.



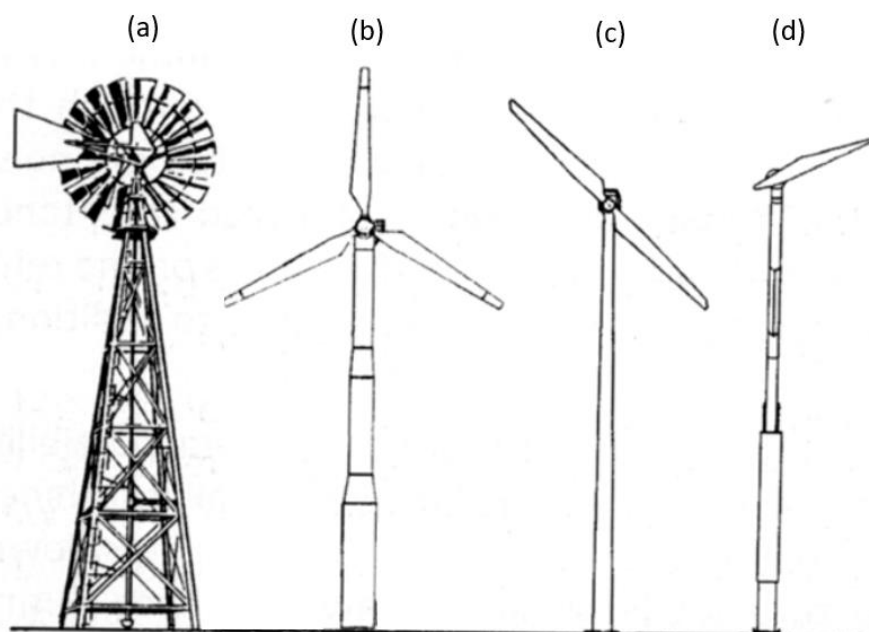
Fonte: Centro brasileiro de energia eólica CBEE (2000).

- Torre: As torres podem ser feitas de aço tubular, de treliças ou de concreto. Elas são projetadas para elevar o rotor até uma altura onde o vento é mais constante e com velocidades mais altas.
- Sistema de controle: É utilizado para a partida e/ou desligamento da turbina, através do monitoramento de todas as partes da turbina.
- Controle de giro: É usado para manter o rotor de frente para o vento quando o vento mudar de direção.

- Sistema de freio a disco: pode ser mecânico, elétrico ou hidráulico, e é utilizado como um sistema auxiliar que para a turbina em condições adversas de operação.
- Gerador elétrico: O mais usado em turbinas eólicas é o gerador assíncrono, responsável por converter a energia mecânica do eixo em energia elétrica.
- Rotor: É o componente rotativo do aerogerador, sendo composto por dois principais elementos: pás e cubo do rotor.
- Pás: São aerofólios longos e curvados que capturam a energia do vento. Elas são feitas geralmente de materiais leves e resistentes, como fibra de vidro ou materiais compósitos. As pás estão conectadas ao cubo, que é fixado ao eixo do rotor.
- Sensores de vento: São sensores anemométricos que medem a velocidade do vento e transmite para o controlador.
- Multiplicador de velocidade: Conecta o eixo de baixa velocidade com o eixo de alta velocidade e aumenta a velocidade rotacional de, aproximadamente, 10-60 rpm para, aproximadamente, 1200-1800 rpm.
- Nacele: Protege todos os componentes da turbina incluindo o gerador, mancais e demais acoplamentos.

A escolha do número de pás para o aerogerador depende da relação entre a velocidade na ponta da pá e a velocidade do vento, relação denominada *Tip Speed Ratio* (TSR) (OGATA, 1995). Para moinhos de vento americanos, que possuem um baixo TSR, é necessário ter uma área de varredura maior (KRAUSE, 1986). Por essa razão, esses moinhos geralmente são construídos com 20 a 30 pás de metal (Figura 2.4-(a)). Por outro lado, as turbinas eólicas que operam em alta velocidade são normalmente construídas com três pás, embora também possam ser encontradas com uma ou duas pás (Figura 2.4-(b)(c)(d)). A seleção do número de pás adequado é fundamental para otimizar a eficiência da turbina eólica, garantindo uma captura máxima da energia cinética do vento.

Figura 2.4 - Diferentes modelos de turbinas eólicas



Fonte: Adaptado de KRAUSE (1986).

A utilização de um baixo número de pás nas turbinas eólicas também é influenciada pelo alto custo desse componente. No rotor com três pás, o custo das pás representa aproximadamente 20% do custo total da turbina. No entanto, os rotores com uma ou duas pás, embora reduzam os custos da turbina, apresentam um projeto mais complexo para evitar esforços gerados pelo movimento das pás em relação à torre. Além disso, esses rotores também enfrentam problemas de ruído devido à necessidade de velocidade rotacional mais elevada para gerar a mesma quantidade de potência que um rotor de três pás. Por outro lado, os rotores com três pás possuem uma distribuição de peso mais equilibrada ao longo da área de varredura, conferindo maior estabilidade dinâmica (EBLIN & HAHN, 2003; KROHN, 2003; BURTON *et al*, 2001; GASCH & TWELE, 2002).

2.3 Conversão de Energia Cinética em Energia Mecânica

A energia cinética proveniente do vento é aproveitada ao ser capturada pelas pás da turbina eólica e convertida em energia mecânica. Esse processo ocorre quando o vento incide sobre as pás, dando origem a duas forças primárias e significativas: a força de arrasto e a força de sustentação. É importante ressaltar que essas forças surgem devido às propriedades físicas do ar em movimento, que possui massa e energia cinética. Com base nas características do ar, como sua velocidade

e densidade, é possível calcular a energia cinética contida no vento através da equação (2.1) (GASCH, 2002):

$$E = \frac{1}{2} m_a v^2 \quad (2.1)$$

Sendo:

E = energia cinética [J];

m_a = massa do ar [kg];

v = velocidade do vento [m/s].

Como uma turbina eólica geralmente não é classificada por energia, mas sim pela potência, então temos a equação (2.2):

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.2)$$

Sendo:

P = potência disponível no vento [W];

t = tempo [s];

m = taxa de variação da massa;

Quando uma massa de ar (m_a) passa através de uma Área (A) em um dado intervalo de tempo (t), existe uma variação da massa através da área de varredura (Figura 2.5), essa taxa de variação pode ser expressa pela equação (2.3) (GASCH, 2002):

$$m = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho A v \quad (2.3)$$

Sendo:

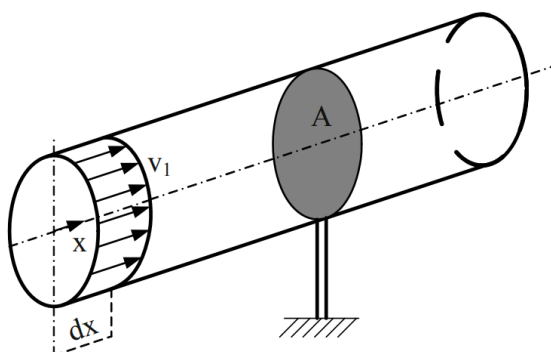
ρ = densidade do ar (1.225kg/m³ ao nível do mar);

A = área de varredura.

Substituindo (2.3) em (2.2), tem-se a equação da potência disponível no vento:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.4)$$

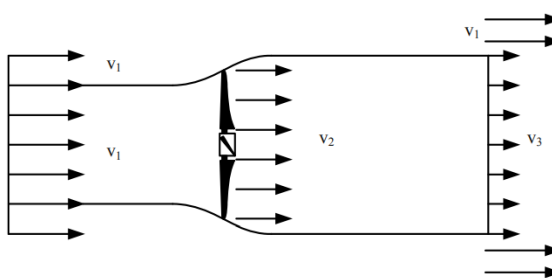
Figura 2.5 - Variação da massa através da área de varredura A.



Fonte: GASCH (2002).

A energia do vento é transformada em energia mecânica no rotor da turbina por meio da diminuição da velocidade do vento. No entanto, é impossível para a turbina eólica extrair completamente toda a potência disponível no vento. Isso ocorre porque, para que isso acontecesse, a velocidade do vento atrás da área de varredura (A) deveria ser igual a zero, ou seja, v_2 seria igual a zero (Figura 2.6). No entanto, essa condição é inviável e violaria a lei da conservação de energia. Por outro lado, se a velocidade do vento atrás da área de varredura fosse a mesma que a velocidade à frente da área de varredura, não haveria redução na velocidade do vento e, conseqüentemente, nenhuma potência seria extraída pela turbina. Isso resultaria em uma potência extraída do vento igual a zero $v_1 = v_2$ (GASCH, 2002).

Figura 2.6 - Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.



Fonte: GASCH (2002).

Deste modo, entre estes dois extremos, deve-se haver uma constante que garanta a máxima extração possível de energia, pela turbina eólica. Em 1926, Betz e Glauert descobriram que a máxima potência que pode ser extraída por uma turbina eólica que é descrita na equação (2.5) (HANSEN, 1998):

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_{p,Betz} \quad (2.5)$$

Onde o coeficiente de potência $c_{p,Betz} = 0,593$.

Isso implica que, mesmo em um processo ideal de extração de energia do vento, apenas 59,3% da energia disponível no vento pode ser convertida em potência mecânica por uma turbina eólica. No entanto, na realidade, o coeficiente de potência (c_p) é ainda menor do que 0,593. Para turbinas que utilizam a força de arrasto para movimentar o rotor, o c_p é inferior a 0,2, enquanto para turbinas que utilizam a força de sustentação, o c_p pode atingir 0,5 (GASCH, 2002).

2.3.1 Força de Arrasto

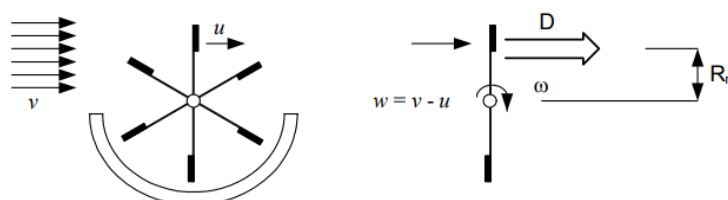
As turbinas eólicas que utilizam a força de arrasto como princípio de funcionamento são conhecidas como turbinas de arrasto ou turbinas de eixo vertical. Nesse tipo de turbina, as pás estão dispostas de forma vertical e são projetadas para capturar a força do vento que age perpendicularmente ao seu eixo de rotação. De acordo com Jansen (1977), a força de arrasto é dada pela equação (2.6):

$$D = c_D \frac{\rho}{2} A v^2 \quad (2.6)$$

Onde c_D representa o coeficiente de arrasto.

Este coeficiente é uma constante de proporcionalidade que varia de acordo com a geometria das pás eólicas. Um exemplo de turbina eólica que utiliza a força de arrasto como princípio de funcionamento é o moinho de vento do tipo Pérsia (Figura 2.7). Nesse tipo de moinho, as pás estão dispostas verticalmente e são projetadas de forma a capturar o vento através da resistência ao seu movimento. O vento atua nas pás do moinho, gerando uma força de arrasto que aciona o movimento do rotor. Esse movimento é então utilizado para realizar tarefas como moer grãos ou bombear água.

Figura 2.7 - Modelo simplificado da turbina do tipo Pérsia



Fonte: MARQUES (2004).

De acordo com o modelo simplificado da Figura 2.7, a velocidade relativa do vento w é uma composição da velocidade do vento v e a velocidade das pás u , onde $u = \omega R$, sendo R o raio da área de varredura da turbina. E a força de arrasto será dada pela equação (2.7) (GASCH, 2002):

$$D = c_D \frac{\rho}{2} A w^2 = c_D \frac{\rho}{2} A (v - u)^2 \quad (2.7)$$

A potência mecânica da turbina pode ser expressa por meio da equação (2.8):

$$P_m = Du \quad (2.8)$$

Substituindo (2.7) em (2.8) tem-se que:

$$P_m = c_D \frac{\rho}{2} A v^3 \left\{ c_D \left(1 - \frac{u}{v} \right)^{2\frac{u}{v}} \right\} \quad (2.9)$$

Considerando que c_p é o coeficiente de potência, a equação (2.10) determina a quantidade de potência disponível no vento que pode ser convertida em potência mecânica na equação (2.11):

$$c_p = c_D \left(1 - \frac{u}{v} \right)^{2\frac{u}{v}} \quad (2.10)$$

Logo,

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p \left(\frac{u}{v} \right) \quad (2.11)$$

O coeficiente de potência é utilizado para comparar quão eficientemente as turbinas convertem a energia cinética do vento em energia mecânica utilizável. Ao calcular e comparar os coeficientes de potência de várias turbinas, é possível determinar quais apresentam o melhor desempenho em termos de aproveitamento da energia eólica disponível.

Na Equação 2.10 observa-se que o c_p depende da relação entre a velocidade na ponta da pá u e a velocidade do vento v . Esta relação denominada TSR é calculada por Hansen (1998) através da equação (2.12):

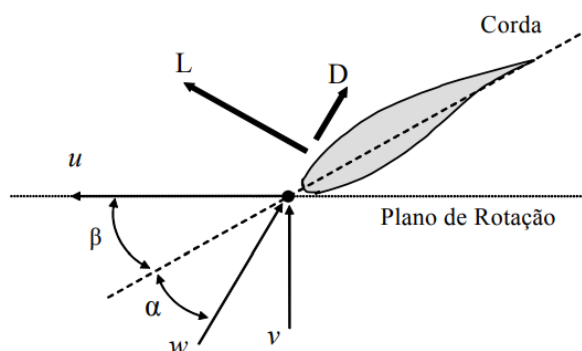
$$\lambda = \frac{wR}{v} \quad (2.12)$$

A curva $c_p(\lambda)$ deste modelo é de extrema importância para compreender o desempenho e a eficiência da turbina eólica (MARQUES, 2004), quando a turbina está parada ($\lambda = 0$) ou quando a velocidade na ponta da pá é igual à velocidade do vento ($\lambda = 1$), a potência extraída do vento é nula. Entre esses dois extremos, o coeficiente de potência atinge seu valor máximo, ou ótimo, quando $\lambda_{opt} = 0.33$. Isso significa que, operando nesse ponto ótimo, apenas 16% da potência disponível no vento pode ser convertida em potência mecânica.

2.3.2 Força de Sustentação

Ao contrário das turbinas que empregam o princípio de força de arrasto para seu funcionamento, as turbinas que utilizam a força de sustentação contam com pás equipadas com perfis aerodinâmicos. Esses perfis são projetados de forma a gerar não apenas a componente de arrasto na direção da velocidade relativa (w), mas também uma componente perpendicular a essa velocidade, conhecida como força de sustentação (Figura 2.8). A interação entre o vento e o rotor resulta em uma força combinada que atua de maneira mais complexa, levando em consideração tanto a força de arrasto quanto a força de sustentação (BURTON *et al*, 2001; PARK, 1981). Essa abordagem permite uma maior eficiência na extração de energia cinética do vento, contribuindo para o desempenho geral das turbinas eólicas.

Figura 2.8 - Definição da força de sustentação e arrasto em um elemento de lâmina.



Fonte: Adaptado de MARQUES (2004).

Na Figura 2.8 observa-se que a velocidade relativa (w) é soma vetorial da velocidade do vento (v) e a velocidade das pás (u). E a força de sustentação é dada pela equação (2.13):

$$L = c_L \frac{\rho}{2} A v^2 \quad (2.13)$$

Sendo c_L o coeficiente de sustentação.

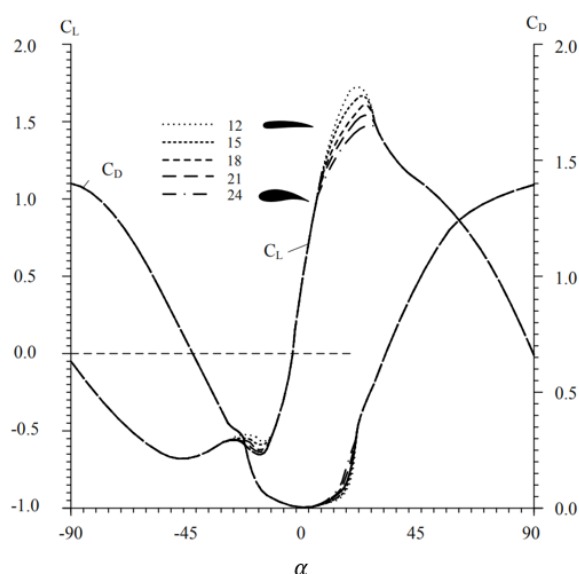
Quando analisamos o comportamento aerodinâmico de um perfil em funcionamento normal, podemos observar que a força de sustentação atua em uma posição aproximadamente a 1/4 do comprimento da corda do perfil. Além disso, é importante destacar que o perfil está operando na região normal de operação, ou seja, ainda não alcançou a região de perda aerodinâmica conhecida como "*stall*". Nesse contexto, a força de sustentação gerada pelo perfil será diretamente proporcional ao

ângulo de ataque (α) entre a direção da corrente de vento e a linha de referência do perfil (BURTON *et al*, 2001; HANSEN, 1998).

A relação entre o ângulo de ataque e a força de sustentação é de suma importância no estudo e aprimoramento do desempenho aerodinâmico. À medida que aumentamos o ângulo de ataque, a força de sustentação gerada pelo perfil aerodinâmico também aumenta. Essa relação direta é essencial para otimizar o funcionamento desses sistemas, pois permite controlar e ajustar a força de sustentação de acordo com as necessidades. Um controle preciso do ângulo de ataque é fundamental para assegurar o desempenho ideal da turbina eólica, garantindo uma extração máxima de energia do vento e uma eficiência aprimorada.

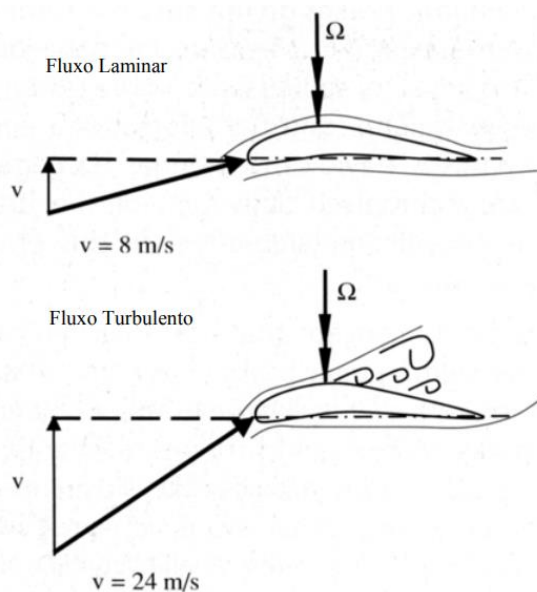
Na Figura 2.9, observa-se que o coeficiente de sustentação (c_L) varia linearmente com o ângulo de ataque (α) para α entre 0 e 10° . Essa faixa é conhecida como região de operação normal, na qual o fluxo de ar sobre o perfil das pás é laminar, conforme exemplificado na Figura 2.10. Entretanto, ao aumentar o ângulo de ataque além de 10° ($\alpha > 10^\circ$), o perfil adentra a região de perda aerodinâmica. Nessa região, o fluxo de ar sobre o perfil se torna turbulento, ocasionando mudanças significativas nas características aerodinâmicas (BURTON *et al*, 2001). Essa transição para o fluxo turbulento afeta a força de sustentação gerada pelo perfil e pode resultar em impactos negativos no desempenho da turbina eólica.

Figura 2.9 - Coeficientes C_L e C_D em função do ângulo de ataque (α).



Fonte: Adaptado de GASCH (2002).

Figura 2.10 - Fluxo laminar e fluxo turbulento.



Fonte: Adaptado de GASCH (2002).

A potência mecânica disponível para extração do vento por uma turbina eólica que utiliza a força de sustentação pode ser expressa por meio da equação (2.14):

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_{p,real}(\lambda, \beta) \quad (2.14)$$

Onde, $c_{p,real}$ depende do TSR (λ), do ângulo de passo (β), da relação c_L/c_D , do perfil selecionado e do número de pás da turbina (GASCH, 2002). Do mesmo modo que, na seção anterior, o torque mecânico será dado pela equação (2.15)

$$T_m = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^3}{G} v^2 c_{t,real}(\lambda, \beta) \quad (2.15)$$

Sendo $c_{t,real} = \frac{c_{p,real}}{\lambda}$. Segundo Gasch (2002), as turbinas eólicas de eixo horizontal de três pás, utilizadas, atualmente, pela indústria eólica, possuem coeficiente de potência (c_p) que pode chegar a 0.5. Esse é um valor próximo ao máximo valor calculado por Betz e Glauert ($c_{p,Betz} = 0.593$).

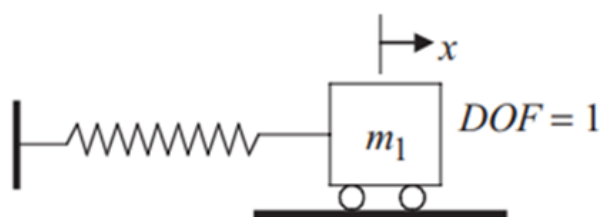
2.4 Vibração Mecânica

Conforme delineado por Sinha (2010), a vibração de um sistema mecânico é intrinsecamente associada a uma troca incessante entre as energias cinética e potencial. A mitigação dos níveis de vibração se efetua mediante a incorporação de elementos dissipadores de energia dentro do sistema em questão. A problemática relacionada à vibração é exacerbada pela influência de excitações externas, as quais

podem variar ao longo do tempo. Um exemplo notório desse desafio é o fenômeno da ressonância observado em máquinas rotativas, o qual surge devido ao desequilíbrio inerente ao rotor, uma condição inevitável em tais sistemas. Em diversas circunstâncias, a vibração é provocada por excitações internas, cuja magnitude depende do próprio nível de vibração, sendo conhecida como oscilações autoexcitadas.

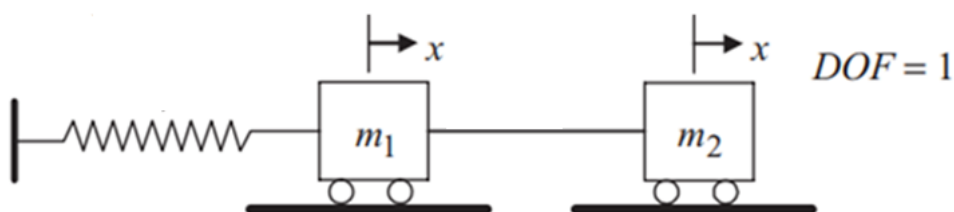
Os graus de liberdade (*Degrees Of Freedom - DOF*) representam o número de coordenadas independentes que são necessárias para descrever a posição de um sistema mecânico em um dado instante. Por exemplo, considerando o sistema ilustrado na Figura 2.11, um único grau de liberdade, denominado como "x", é atribuído ao deslocamento da massa m_1 . Embora a Figura 2.12 apresente duas massas, m_1 e m_2 , o sistema é caracterizado por apenas um grau de liberdade "x", uma vez que ambas as massas estão interligadas por uma conexão rígida, e, portanto, seus deslocamentos não são independentes (SINHA, 2010).

Figura 2.11 - Sistema de um DOF com uma única massa.



Fonte: Adaptado de SINHA (2010).

Figura 2.12 - Sistema de um DOF com duas massas.



Fonte: Adaptado de SINHA (2010).

Conforme destacado por Murphy, Vance e Zeidan (2010), é notável que partes rotativas desequilibradas possam induzir, de acordo com a segunda lei de Newton, uma reação nos suportes dos rolamentos, manifestando-se como uma força rotativa. Essa força rotativa, por sua vez, acarreta uma aceleração centrípeta sobre o centro de massa do rotor, resultando em sua vibração. As vibrações podem alcançar

amplitudes significativas quando a frequência de excitação, ou seja, a frequência de rotação do rotor, se aproxima da frequência natural de ressonância da estrutura da máquina.

Um modelo simples de um grau de liberdade SDOF, consiste em uma massa rígida, uma mola e um amortecedor, que pode ser construído para representar as características de vibração de qualquer máquina real dentro de uma frequência natural de interesse. Este é denominado de modelo modal (MURPHY; VANCE; ZEIDAN, 2010). Toda a estrutura real possui um número infinito de frequências naturais, mas muitos problemas de vibração em máquinas envolvem apenas uma dessas frequências. É por esse motivo que o SDOF pode ser útil para analisar vibrações em máquinas.

2.4.1 Massa

Conforme Girdhar e Scheffer (2004) enfatizam, a massa é um atributo que denota a inércia de um corpo, isto é, sua tendência de manter seu estado de movimento ou repouso. Quando uma força atua sobre esse corpo, ela busca alterar esse estado, mas essa mudança encontra resistência devido à massa do objeto. A relação entre a massa e a capacidade de armazenar energia cinética é discutida por Sinha (2010). Conforme a segunda lei de Newton, a aplicação de uma força sobre um corpo resultará em sua aceleração, o que implica o ganho de energia cinética. Portanto, é possível empregar a segunda lei de Newton conforme a equação (2.16):

$$F(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.16)$$

Na dinâmica de um corpo, a aceleração dele é representada pela segunda derivada do deslocamento $x(t)$. Sinha (2010) mostra que a expressão que descreve a energia cinética (EC) de um corpo é expressa pela equação (2.17):

$$EC = \frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (2.17)$$

Onde a derivada do deslocamento $x(t)$ é a velocidade do corpo.

2.4.2 Rigidez

Segundo por Girdhar e Scheffer (2004), a rigidez de um objeto refere-se à quantidade de força necessária para deformá-lo em uma certa distância. Essa rigidez,

também conhecida como constante elástica, está intrinsecamente ligada à capacidade do objeto em armazenar energia potencial elástica. Por outro lado, de acordo com as considerações de Sinha (2010), ao examinar uma mola de massa insignificante submetida a uma força $f(t)$ em uma de suas extremidades, é essencial que haja uma força de igual magnitude na outra extremidade para manter o equilíbrio do sistema, assegurando que a soma das forças internas seja nula. Essa força é diretamente proporcional à deformação da mola, ou seja, à variação na distância entre suas extremidades, cujo valor pode ser calculado com base na equação (2.18).

$$f(t) = k(x_2 - x_1) \quad (2.18)$$

Onde x_1 e x_2 são as posições absolutas das duas extremidades, e k é a constante elástica ou rigidez. Sinha (2010), mostra que a energia potencial (EP) elástica é dada pela equação (2.19):

$$EP = \frac{1}{2}k(x_2 - x_1)^2 \quad (2.19)$$

Nota-se que a energia potencial é independente do sinal de $(x_2 - x_1)$, o que significa que a energia potencial elástica não depende se o corpo está sendo comprimido ou estendido (MERCURI, 2011).

2.4.3 Amortecimento

Quando uma força é aplicada para iniciar o movimento de uma parte ou estrutura, é importante destacar que há mecanismos intrínsecos que atuam para reduzir esse movimento, ou seja, sua velocidade. Esse fenômeno de desaceleração é conhecido como amortecimento, conforme descrito por Girdhar e Scheffer (2004). O amortecimento possui a capacidade inerente de dissipar a energia presente no sistema, desempenhando um papel essencial na regulação do movimento.

De acordo com as observações de Sinha (2010), ao considerarmos um amortecedor de massa insignificante, a soma das forças que atuam sobre ele deve ser igual a zero para manter o equilíbrio. Isso implica na existência de duas forças de igual magnitude, mas com sentidos opostos, agindo em ambas as extremidades do amortecedor. A intensidade dessas forças é diretamente proporcional à diferença de velocidade entre as extremidades e pode ser expressa por meio da equação (2.20), em que "c" representa a constante de amortecimento.

$$f(t) = c \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) \quad (2.20)$$

O mesmo autor deduz que a energia dissipada pelo amortecedor (ω_d) é igual ao trabalho realizado na massa contra a força de amortecimento e tem seu valor determinado pela equação (2.21):

$$\omega_d = c \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) \frac{dx_2}{dt} \cdot dt \quad (2.21)$$

2.4.4 Sinal de Vibração

Conforme discutido por Girdhar e Scheffer (2004), a vibração é caracterizada por um movimento periódico e harmônico, em que a posição da massa varia ao longo do tempo de acordo com uma função senoidal, como exemplificado na equação (2.22):

$$X(t) = X_0 \cdot \text{sen}\omega t \quad (2.22)$$

Aqui, X_0 representa a posição máxima alcançada pelo corpo, enquanto ω denota a velocidade angular da vibração. Derivando a equação (2.22), obtemos a expressão para a velocidade do corpo, conforme indicado na equação (2.23):

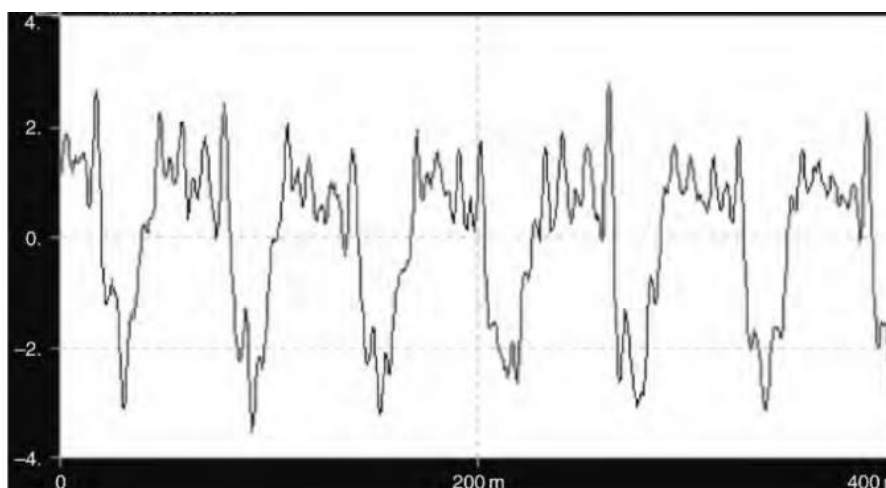
$$V = X_0 \cdot \omega \cdot \text{cos}\omega t \quad (2.23)$$

Ao derivar a equação (2.23) é obtida a aceleração, cujo valor é dado pela equação (2.24):

$$A = -X_0 \cdot \omega^2 \cdot \text{sen}\omega t \quad (2.24)$$

A frequência é a medida do número de vezes que a vibração se repete em um segundo, ou seja, os ciclos por segundo. O comprimento de onda representa a extensão ocupada no espaço por um ciclo da onda, enquanto a amplitude é a altura do pico da onda em relação a uma referência. É importante destacar que a amplitude está diretamente relacionada com a quantidade de energia transmitida pela onda. Na Figura 2.13, a seguir, é ilustrado um exemplo de um sinal de vibração.

Figura 2.13 - Vibração em uma máquina rotativa.



Fonte: GIRDHAR & SCHEFFER (2004).

À medida que a massa em vibração se desloca, sua velocidade experimenta flutuações. Quando ocorre uma mudança na direção do movimento, a velocidade é reduzida a zero e atinge seu valor máximo quando a massa está na posição central, chamada de posição neutra. Essa velocidade máxima é comumente referida como pico de velocidade. No contexto da análise de vibrações, a velocidade de vibração RMS (*Root Mean Square*) é frequentemente empregada para determinar a velocidade eficaz de uma função periódica.

3 CONTROLE E CONFIABILIDADE NA FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS

3.1 Estrutura de Pás Eólicas

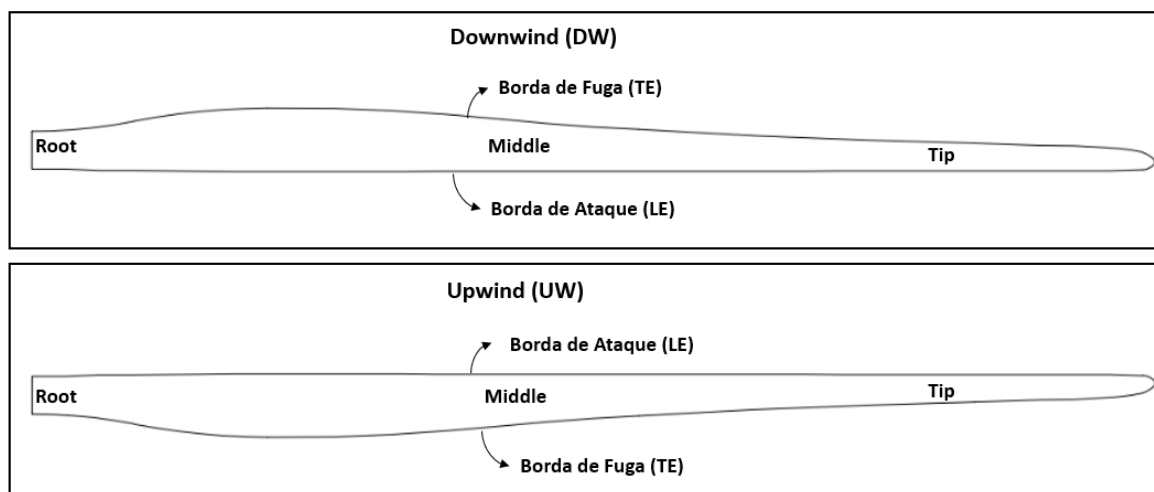
As pás de uma turbina eólica moderna desempenham um papel crucial na operação e no desempenho global da turbina. Projetadas para uma vida útil média de 20 anos, elas estão sujeitas a um número significativo de rotações, variando entre 10^8 a 10^9 ciclos (SØRENSEN *et al*, 2010). Esse alto número de ciclos faz da fadiga um aspecto de extrema importância no projeto estrutural e na escolha dos materiais utilizados na fabricação das pás. Além da resistência à fadiga, o projeto de uma pá precisa atender a diversos requisitos (BURTON *et al*, 2001):

- Maximizar a produção anual de energia, levando em consideração o regime local de vento.
- Resistir a cargas extremas, como rajadas de vento e situações de parada de emergência, garantindo a integridade estrutural da turbina.
- Controlar o deslocamento da ponta da pá para evitar colisões com a torre, garantindo a segurança e a durabilidade do sistema.
- Evitar ressonâncias indesejadas que possam comprometer o desempenho da turbina e causar danos à estrutura.
- Minimizar o peso e o custo, buscando uma eficiência estrutural adequada sem comprometer a confiabilidade e a viabilidade econômica do projeto.

Durante processo de fabricação de uma pá eólica, a mesma é inicialmente dividida em duas cascas: *Downwind* e *Upwind* (Figura 3.1). Cada casca exibe áreas particulares que desempenham funções únicas na aerodinâmica da turbina.

A casca *Upwind* é projetada para enfrentar as condições mais desafiadoras, pois recebe o impacto direto do vento. Ela é responsável por lidar com altas cargas aerodinâmicas e rajadas de vento, garantindo a estabilidade e a resistência estrutural necessárias. Por outro lado, a casca *Downwind* está posicionada na parte posterior da pá, onde o vento já tem atravessado a casa *Upwind*. Essa região auxilia no controle do fluxo de ar e na redução das turbulências geradas pelo perfil aerodinâmico, contribuindo para minimizar o arrasto e melhorar a eficiência global da turbina.

Figura 3.1 - Cascas downwind e upwind de uma pá eólica.



Fonte: Autoria própria.

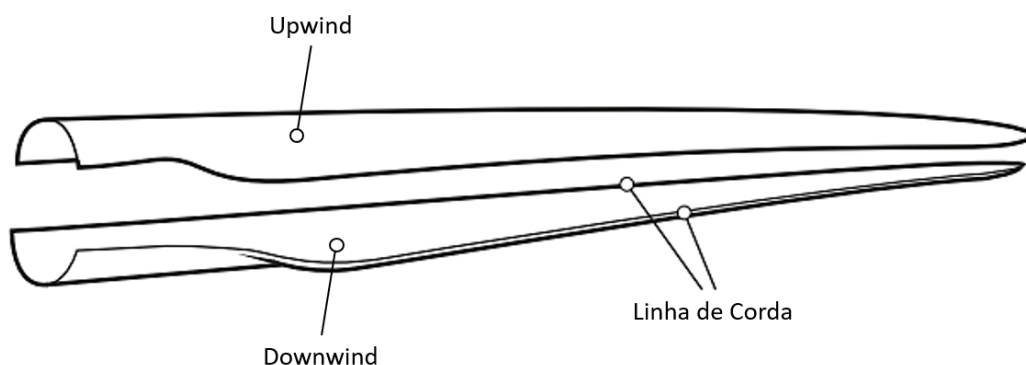
O comprimento das cascas é determinado por três componentes que possuem diferentes objetivos, nomeadamente estruturais e aerodinâmicos. Estes grupos são (PEREIRA, 2022):

- **Root:** trata-se da zona de transição entre a pá e o rotor, assegurando a conexão entre estes. Por este motivo, é também a zona das pás que vai ter maiores esforços, conduzindo a força do vento absorvida pelas pás até ao rotor, garantido a estabilidade das pás como elemento estrutural. Portanto, a sua principal função é de carácter estrutural;
- **Middle:** esta secção incorpora funções aerodinâmicas por ser uma zona muito considerável da pá, mas também é indispensável do ponto de vista estrutural, pois assegura a transição entre a *root* e a *tip*. Devido a isto, são usadas as secções mais finas possíveis que sejam estruturalmente resistentes.
- **Tip:** trata-se da zona mais crítica aerodinamicamente, sendo estudada com o objetivo de maximizar a captação das forças do vento. Como é a zona mais distante da pá ao rotor, as forças exercidas nesta irão provocar elevados momentos, e assim, otimizar a força cinética do vento. São usadas secções mais finas e geometrias que permitem obter menos perdas e reduzir a poluição sonora provocada pelas turbinas;

Além disto, as cascas possuem bordas com diferentes formatos. A borda de ataque (*Leading Edge – LE*) é a borda frontal da pá que enfrenta diretamente o vento. Geralmente projetada com um perfil aerodinâmico específico para otimizar a eficiência

de captura de energia. Ela pode ter uma forma arredondada, pontiaguda ou outras configurações que ajudam a direcionar o fluxo de ar ao longo da superfície da pá. Já a borda de fuga (*Trailing Edge – TE*) localiza-se na parte traseira da pá. A sua geometria é projetada para minimizar o arrasto, permitindo que o fluxo de ar se afaste suavemente da superfície da pá. Isso ajuda a reduzir as perdas de energia causadas pelo arrasto aerodinâmico, melhorando a eficiência da turbina. A linha reta conectando as bordas de ataques e de fuga são chamadas de linha de corda do aerofólio (Figura 3.2).

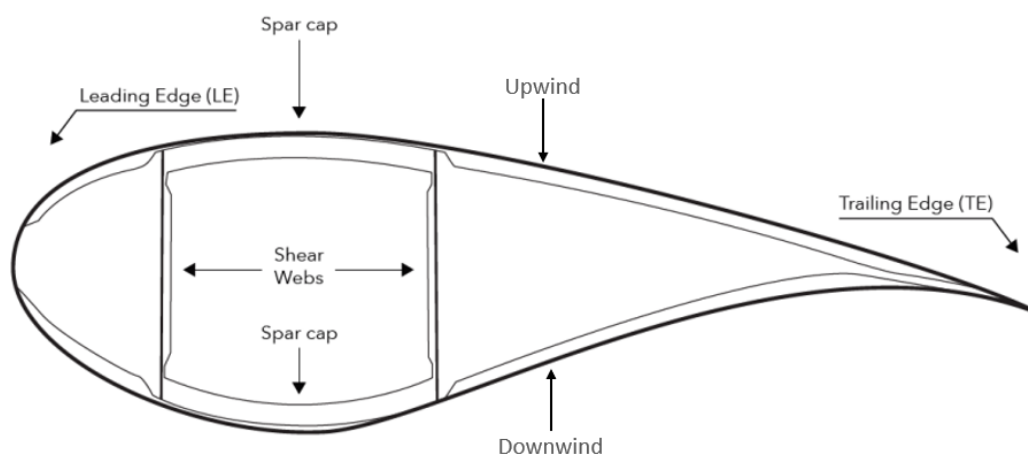
Figura 3.2 - Linha de corda de uma pá eólica.



Fonte: Adaptado de CORTIR (2019).

No interior da pá existem estruturas que possuem a função de pilares, recebendo as tensões de cisalhamento, não permitindo que as cascas ovalizem ou empenem. Essas estruturas são conhecidas como pré-fabricados, pois, passam por um processo de fabricação antes das cascas. Esses pré-fabricados são divididos em dois elementos: *sparcaps* e *webs* (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Seção transversal de uma pá eólica.



Fonte: Adaptado de CORTIR (2019).

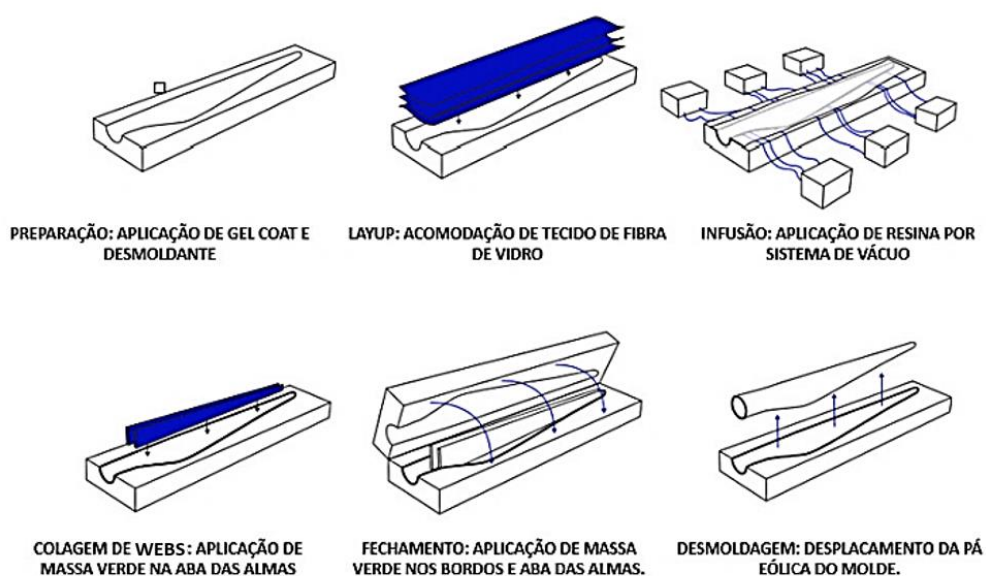
De acordo com Cortir (2019), as *sparcaps* são elementos estruturais que se encontram longitudinalmente ao longo das cascas e que têm como principal objetivo colaborar nas distribuições dos esforços e cargas presentes nas pás até à *root*. As *webs* fazem a ligação entre as *sparcaps* presentes na casca *downwind* com a casca *upwind*, mantendo assim a geometria das pás.

É comum utilizar fibra de carbono na composição das *sparcaps*, enquanto as *webs*, assim como as cascas, são submetidas ao processo de infusão de fibra de vidro com resina e agente catalisador. Este método é adotado devido às propriedades específicas desses materiais, visando otimizar as características estruturais e de resistência do compósito final. Essas escolhas cuidadosas de materiais e processos refletem a busca por uma sinergia entre propriedades mecânicas, durabilidade e leveza, visando aprimorar a eficiência e a confiabilidade da pá eólica.

3.1.1 Processo de Fabricação de Pás Eólicas

A fabricação de pás eólicas é um processo complexo e multifacetado, no qual o *design* e a seleção de materiais desempenham papéis cruciais para assegurar a eficiência energética, a confiabilidade operacional e o compromisso com a sustentabilidade ambiental. O fluxo macro do processo de moldagem é mostrado na Figura 3.4:

Figura 3.4 - Esquema do fluxo macro de um processo de fabricação de pás eólicas.



Fonte: Adaptado de CORTIR (2019).

Segundo Cortir (2019), o processo de fabricação pode ser resumido nas seguintes etapas:

- **Preparação:** é aplicado um desmoldante para evitar delaminações no molde ou na peça e, também, um *gelcoat*, que visa dar um acabamento mais uniforme à região externa da pá;
- **Lay up:** etapa na qual se começa a acomodação das camadas de fibras, as quais devem ser dispostas seguindo uma sequência e uma orientação bem definida. Além disso, ocorre o posicionamento do núcleo, que consiste, normalmente, nas *sparcaps* e madeira balsa na região de raiz.
- **Infusão:** é iniciada pela montagem do plano que visa fornecer maior facilidade ao movimento do fluxo de resina, assim garantindo que todas as camadas sejam molhadas uniformemente e com a velocidade necessária. Depois, é feita a bolsa de vácuo e o vácuo propriamente dito, com o auxílio de bombas. Então, começa o processo de infusão, dado pela variação de pressão, que força a resina a ser direcionada para dentro da peça. Após isso, há a cura do laminado, quando se retiram os consumíveis (sobras do plano de infusão);
- **Colagem das webs:** é quando se aplica a resina de colagem na linha de colagem da casca ou diretamente na aba do pré-fabricado *web*;
- **Fechamento:** consiste na aplicação da massa de colagem na aba do lado oposto das *webs* e, também, nas bordas de ataque e fuga. Então, o molde é fechado e é aguardado o tempo de cura de todos os químicos utilizados no processo;
- **Desmoldagem:** o molde é aberto e a pá é içada com a ajuda de uma ponte rolante. Depois, a pá eólica segue para os processos de acabamento e pintura.

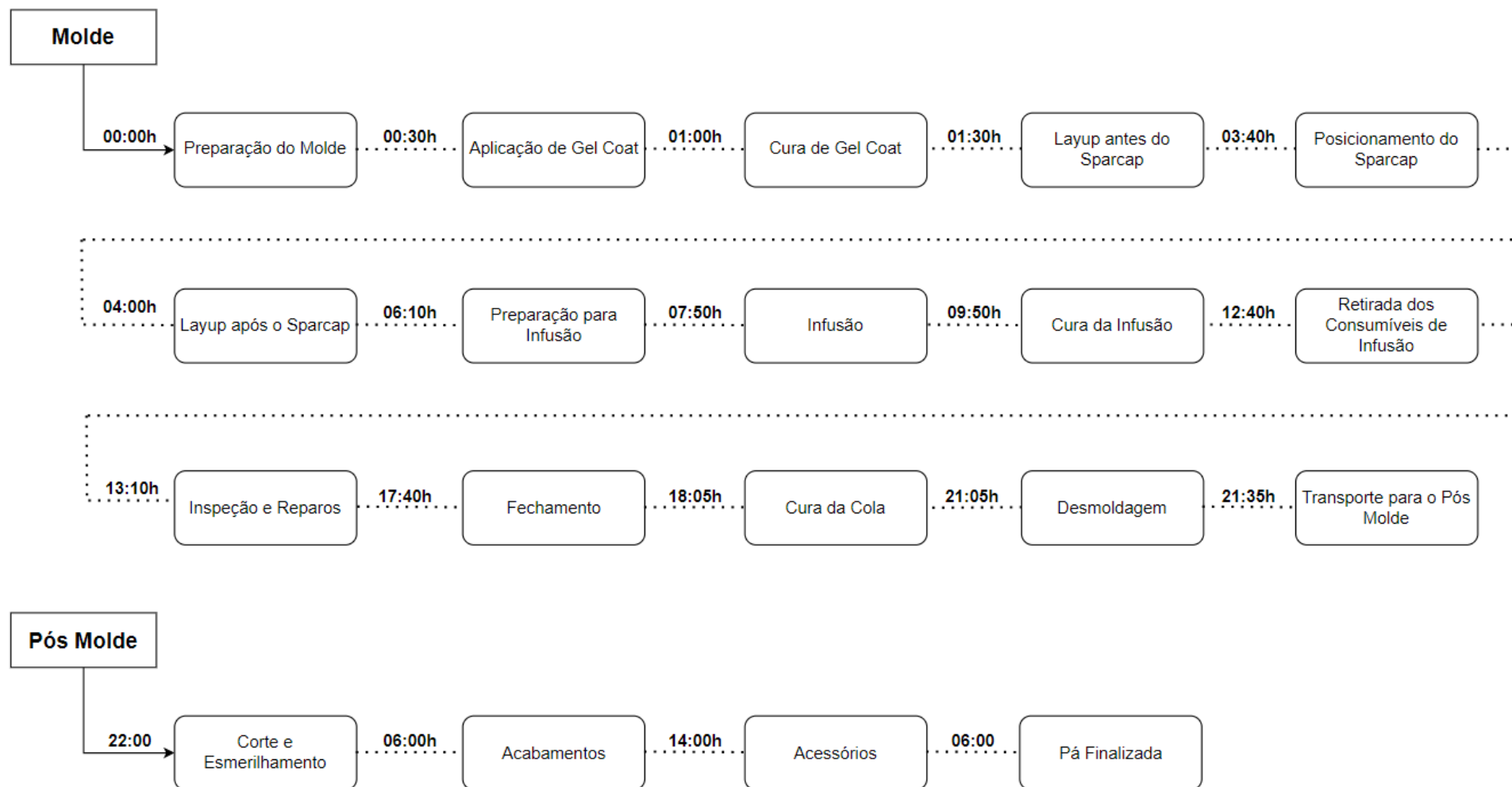
Após a conclusão dos processos de moldagem, tem-se, ainda, o processo de pós molde, a qual se destina à realização dos acabamentos e reparos na pá. Em geral, esse processo é subdividido em três etapas:

- **Corte e Esmerilhamento:** Após uma minuciosa avaliação da casca moldada pelos inspetores de qualidade, caso sejam identificadas quaisquer não conformidades, tais como áreas que não receberam resina suficiente, partes não devidamente coladas ou defeitos no laminado, procede-se ao processo de reparo. Essa etapa destina-se à correção dos defeitos detectados na pá eólica, sendo executada por meio da realização de pequenas aberturas na superfície da pá.

- **Acabamentos:** Nesta etapa, é realizada uma aplicação cuidadosa de tinta na superfície da pá eólica, com o objetivo de corrigir possíveis imperfeições, como falta de tinta, bolhas ou arranhões. Essa nova camada de tinta, denominada "*top coat*", visa aperfeiçoar o acabamento e garantir que todas as irregularidades na pintura sejam corrigidas, conferindo à pá um aspecto visual uniforme e esteticamente agradável. Além disso, realiza-se uma verificação geométrica minuciosa na pá. Esse procedimento tem como foco a avaliação da circularidade da pá em duas áreas específicas: a região da *root* e o *tip*.
- **Acessórios:** Na fase final do processo, procede-se à incorporação de acessórios específicos na pá eólica, personalizados de acordo com as demandas de cada cliente. Entre esses acessórios, incluem-se itens como cabos para raio e vórtices, por exemplo.

O tempo de cada subprocesso é influenciado pela experiência dos operadores e pela quantidade de defeitos gerados na superfície da pá. Entretanto, o tempo médio de produção de uma pá eólica está representado na Figura 3.5:

Figura 3.5 - Linha do tempo da fabricação de uma pá eólica.



Fonte: Autoria própria.

Os sub processos e materiais usados na fabricação variam de acordo com cada fabricante. O principal material das pás é composto por fibras de alto desempenho (Figura 3.6), podendo ser materiais artificiais, orgânicos ou inorgânicos. Essas fibras são especialmente projetadas para aplicações específicas que requerem um desempenho excepcional em termos de força, rigidez, resistência ao calor ou substâncias químicas. Dentre os materiais utilizados, os compósitos ganham destaque e conquistam cada vez mais o mercado. Eles oferecem vantagens significativas, como alta resistência específica, rigidez, valor e disponibilidade. Entretanto, também podem apresentar algumas desvantagens, tais como delaminação, dissolução e quebra da matriz (SOHEL & FANGUEIRO, 2016; PASTUSZAK & ALEKSANDER MUC, 2013; VENTURA, 2009).

Figura 3.6 - Posicionamento de camadas de fibra de vidro em uma casca de pá eólica.



Fonte: COSTA (2022).

Os procedimentos de fabricação das pás podem introduzir condições no compósito que influenciam significativamente a vida útil à fadiga e as possíveis falhas. Essas condições incluem variações locais na homogeneidade da mistura de resina, variações locais na porosidade, curvatura local das fibras e desalinhamento das fibras, bem como tensões residuais locais (CORTIR, 2019). Estas condições são variáveis em todos os processos de fabricação de compósitos e devem ser consideradas minuciosamente no projeto.

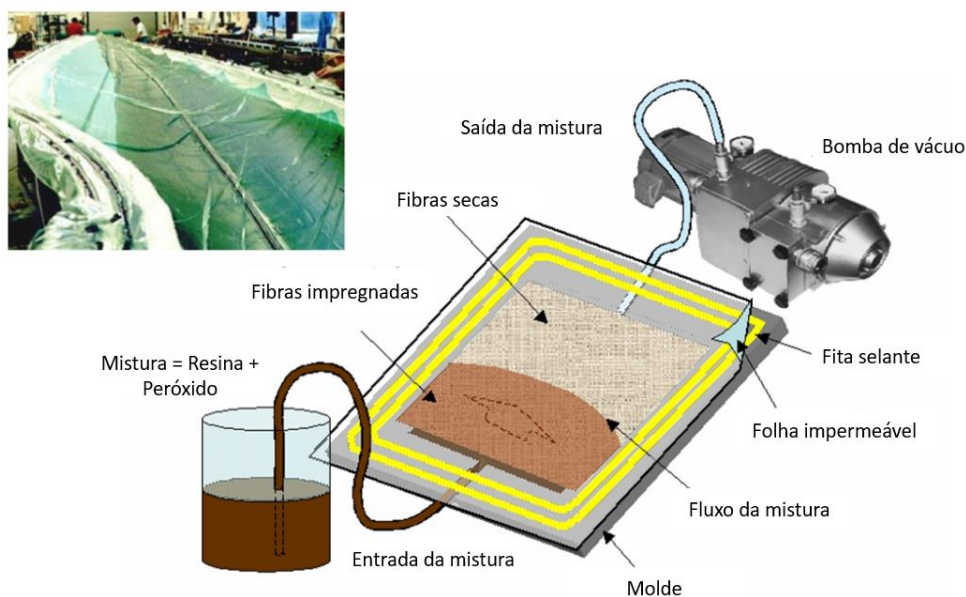
3.1.1.1 *Processo de Infusão*

As pás eólicas se constituem a partir da incorporação de fibras de vidro, um núcleo de fibra de carbono, e a reação da resina de poliéster insaturada com um agente catalisador, como por exemplo, o peróxido. Infusão é um termo abrangente usado para descrever essa incorporação de materiais, onde as camadas de fibra de vidro e o núcleo são sobrepostos, e a mistura de resina e peróxido é controladamente injetada sob pressão e sugada por vácuo para assegurar a impregnação adequada das fibras, esse método é chamado de *Vacuum Infusion Process* (VIP). Para Mushadad (2012), a estratégia de infusão de resina é fundamental para alcançar uma boa proporção de fibra para resina, com distribuição uniforme e no menor tempo possível para produção em massa e melhor qualidade do produto. Lopes (2009) afirma que o VIP promove a obtenção de um laminado robusto, de elevada qualidade e com uma reduzida quantidade de imperfeições.

O processo de infusão caracteriza-se por um escoamento de resina, proveniente de um recipiente, desde os canais de entrada no laminado até aos canais de saída, que conduzem a um recipiente intermediário. A principal dificuldade encontrada durante o planejamento do processo de infusão remete ao tamanho, a forma e o tipo de laminado que se pretende fabricar, o que requer uma diferente disposição dos canais para cada formato de peça, para permitir o escoamento completo por todo o laminado, sem que ocorra desfasamento da progressão do fluido nem solidificação da resina injetada antes da infusão estar completa (LOPES, 2009). Isso nos remete ao cuidado com relação à análise de problemas que podem estar associados aos equipamentos responsáveis por conduzir todo o processo de infusão.

Essa particularidade torna a infusão um processo altamente sensível, já que demanda um rigoroso controle de diversos parâmetros para assegurar que a casca apenas inicie o processo de cura quando toda a fibra estiver completamente impregnada. O modo como as fibras absorvem a mistura de resina e peróxido é o fator decisivo que pode resultar em uma série de reparos necessários devido a defeitos na infusão e, em casos extremos, a necessidade de descartar completamente a pá. A disposição comum para VIP está ilustrada na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Representação esquemática do processo de infusão a vácuo (VIP).



Fonte: RIJSWIJK (2007).

Para assegurar um controle meticuloso das variáveis inerentes ao processo de infusão, tais como a temperatura ambiente, a temperatura da resina e do peróxido, a densidade da resina e do peróxido, a pressão na linha de resina e peróxido, a condução do vácuo e a proporção de mistura, utilizam-se máquinas de infusão. Essas máquinas executam a gestão integral desses parâmetros mediante o uso de um controlador proporcional integral derivativo (PID) e a configuração de *setpoints* de alarme. A quantidade de IMs por casca varia de acordo com o tamanho do molde, geralmente oscilando entre 2 e 4 IMs.

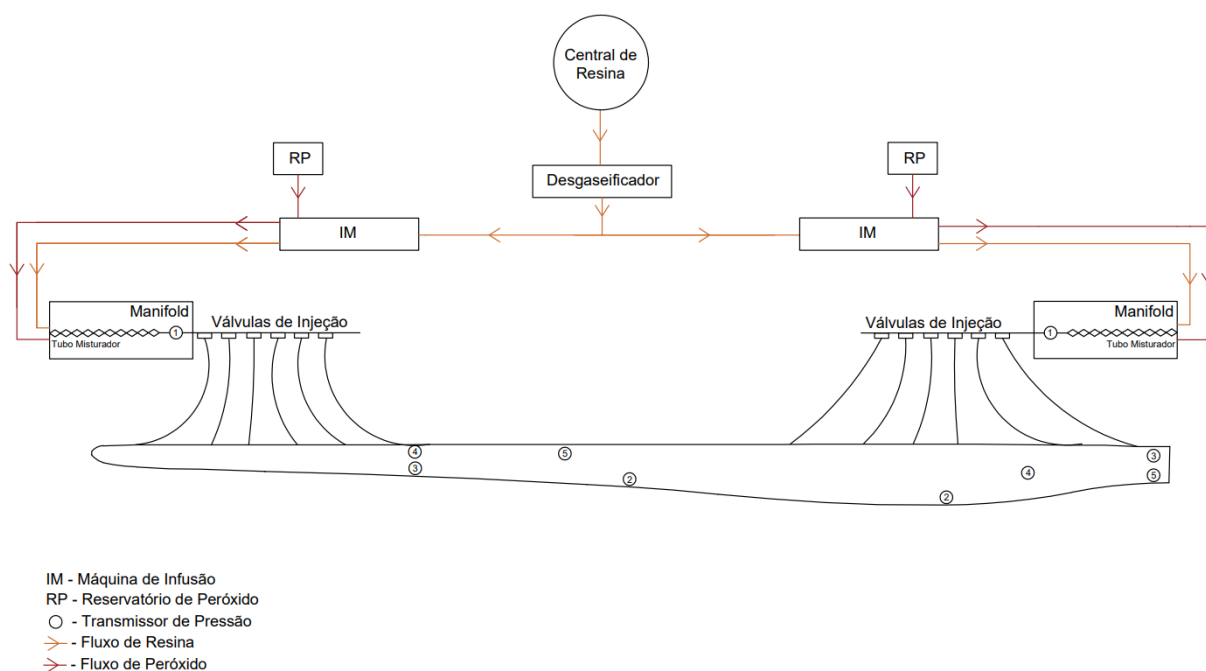
Adicionalmente, ao longo do percurso da resina desde o tanque até as máquinas de infusão, existe a possibilidade de que bolhas se formem devido à agitação e à entrada de ar na linha de resina. A presença dessas bolhas durante o processo de infusão é uma das principais causas de vazios no laminado. Conforme evidenciado no experimento conduzido por Santos (2018), a redução na tensão de ruptura de um material compósito varia em torno 3,91% para materiais que possuem a presença de vazios. Portanto, é empregado um equipamento desgaseificador antes que a resina alcance as IMs. O desgaseificador, em sua configuração típica, consiste em perneiras sobrepostas e espaçadas, permitindo que a resina flua sobre elas, eliminando, dessa forma, todas as bolhas presentes no fluido.

O agente catalisador, devido ao seu baixo volume por casca, tem seu recipiente de armazenamento acoplado à IM. Devido à curta distância entre o tanque e a bomba,

observa-se uma incidência reduzida de bolhas na linha. A resina e o peróxido são misturados no tubo misturador localizado dentro de um *manifold* e são introduzidos na casca por meio de válvulas de injeção (*Injection Valves – IV*). O *manifold* retrata um mecanismo de distribuição o qual direciona a resina e o peróxido de maneira controlada e precisa através das válvulas de injeção para o laminado.

Antes de iniciar o processo de infusão, é necessário verificar a operação normal dos transmissores de pressão (*Pressure Transmitter – PTs*) em condições ambiente. Para isso, os PTs devem registrar uma pressão dentro da faixa de 0 a ± 1 cBar, correspondente à pressão atmosférica. Após passar por esse teste preliminar, a IM permite que esses sensores sejam posicionados na casca conforme representado na Figura 3.8:

Figura 3.8 – Desenho esquemático do processo de infusão.



Fonte: Autoria própria.

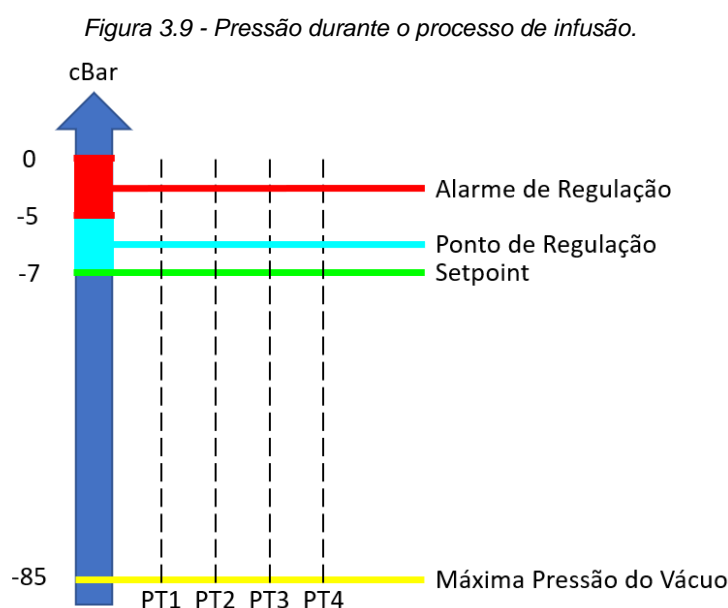
Posteriormente, é essencial conduzir um teste de vácuo automatizado, no qual a IM utiliza o transmissor de pressão das bordas LE e TE existente para medir a pressão de vácuo antes do início da infusão e calcular a taxa de queda do vácuo. A execução deste teste é habilitada quando todos os PTs atingem a marca de -85 cbar. Geralmente, a taxa de queda aceitável para este teste é de 0,50 cBar/min. Se, após

* cBar = centésimo de Bar.

alguns minutos, a máquina de infusão detectar uma taxa de queda adequada, o operador estará autorizado a prosseguir com o próximo teste.

O último teste consiste em um teste de amostragem, que tem por finalidade garantir que, durante a infusão, as bombas de resina e peróxido, bem como o misturador, estejam operando de maneira apropriada para fornecer a porcentagem de mistura esperada. Nesse contexto, a IM irá bombear uma quantidade fixa de resina com uma taxa predefinida de peróxido e calculará se a porcentagem de mistura coincide com o *setpoint* estabelecido. No caso de qualquer obstrução na linha de resina ou peróxido, a máquina emitirá um alarme, e o operador deverá investigar as possíveis causas. Após a conclusão desse procedimento de validação, a infusão deve ser iniciada em um prazo de 10 minutos. Se não for iniciada dentro do período estipulado, será necessário realizar um novo teste de amostragem, a fim de mitigar o risco de cura na linha de peróxido.

Após a aprovação dos testes em todas as máquinas de infusão destinadas ao processo, é permitido iniciar a infusão. Ao longo do procedimento, o operador deve monitorar os alarmes que poderão ser exibidos na máquina, tais como a pressão nos PTs, o número de válvulas de injeção abertas, a porcentagem de mistura, o fluxo, bem como as temperaturas e densidades da resina e do peróxido. À medida que a mistura impregna as fibras durante a infusão, a pressão se aproximará do valor definido, conforme ilustrado na Figura 3.9.



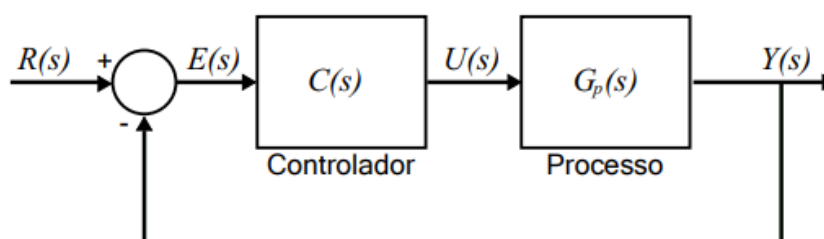
Fonte: Autoria própria.

Quando a pressão cai abaixo do valor do *setpoint* de -7 cBar, a IM entrará em ação para aumentar a pressão. Se a pressão estiver acima ou igual a -7 cBar, mas ainda abaixo do limite de alarme de -5 cBar, a IM tomará medidas para controlar e manter a pressão no valor do *setpoint*. Entretanto, quando a pressão atingir ou exceder o limite de alarme de -5 cBar, um alarme será acionado e a IM intensificará o processo de regulação. Após a completa impregnação de toda a fibra da casca com a mistura, o próximo passo é o processo de cura, que tem uma duração média de 3 horas. Além disso, ao final do processo de infusão, é necessário submergir o *manifold* em um produto químico de limpeza para evitar qualquer catalisação interna da resina e do peróxido.

3.2 Controle PID

Em um trabalho realizado por Murrall *et al.* (2003), a definição de um sistema de controle é apresentada de forma simplista. Segundo essa perspectiva, um sistema de controle é um dispositivo no qual uma quantidade medida é utilizada para ajustar o comportamento do sistema por meio de computação e atuação. No entanto, uma abordagem mais contemporânea de Guimarães (2013) para o papel do controle, reconhece a realimentação como uma ferramenta fundamental para lidar com incertezas. Essas incertezas podem se originar de diversas fontes, como variações nos parâmetros, condições de operação, limitações práticas ou perturbações externas não controladas, como ruído. Essa visão destaca o motivo pelo qual o controle com realimentação (Figura 3.10) é amplamente utilizado em todas as áreas da tecnologia moderna, fornecendo robustez diante da incerteza.

Figura 3.10 - Controle por realimentação da saída.



Fonte: Autoria própria.

O controlador por realimentação mais amplamente empregado é o controlador PID (Proporcional Integral Derivativo). Ele opera calculando a ação de controle como uma combinação ponderada dos termos proporcional, integral e derivativo. Nesse

processo, o erro entre a variável controlada e o valor desejado (*setpoint*) é utilizado para gerar o sinal de controle, com o intuito de minimizar essa discrepância.

O erro no controlador é determinado como a discrepância entre a variável do processo (*Process Variable - PV*) e o valor de referência (*Setpoint - SP*), representado pela equação (3.1):

$$e(t) = SP - PV \quad (3.1)$$

A ação de controle resultante do componente proporcional (P) é diretamente relacionada à sua entrada, ou seja, ao sinal de erro ao longo do tempo. É expresso pela equação (3.2):

$$U(t) = K_p e(t) \quad (3.2)$$

sendo K_p a constante de proporcionalidade a ser ajustada.

Aplicando a transformada de Laplace ao sinal $U(t)$ obtemos a equação (3.3):

$$U(s) = K_p E(s) \quad (3.3)$$

sendo (s) a frequência complexa resultante da transformada de Laplace.

Já o controlador Proporcional Integral (PI) opera gerando sua saída em relação tanto ao erro (P) quanto à integral do erro (I). Isso pode ser expresso pela equação (3.4):

$$u(t) = K_p e(t) + K_p \frac{1}{T_i} \int e(t) \quad (3.4)$$

sendo T_i o tempo integral do controlador PI.

Ao aplicar a transformada de Laplace na equação (3.4), assumindo condições iniciais nulas, obtemos a função de transferência $G_c(s)$ do controle PI (equação 3.5):

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \quad (3.5)$$

Em processos de controle, é comum observar que a saída do sistema demonstra uma certa "inércia" em relação às alterações na variável de entrada. Essa inércia resulta da dinâmica do processo, em que uma mudança na variável de controle leva algum tempo para causar um impacto significativo na saída do sistema. Essa característica pode resultar em transientes com grande amplitude e oscilações de longo período, em alguns casos levando a respostas instáveis. A ação derivativa, quando combinada com a ação proporcional, tem a finalidade de antecipar a ação de

controle de modo a acelerar a resposta do processo. Nesse cenário, o sinal de controle a ser aplicado é calculado com base em uma previsão da saída do sistema. A equação para os controladores proporcional derivativo (PD) é dada pela equação (3.6):

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.6)$$

Onde T_d é o tempo derivativo.

Aplicando a transformada de Laplace à equação (3.6), assumindo condições iniciais nulas, obtemos a função de transferência $G_c(s)$ do controle PD (equação 3.7):

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + sT_d) \quad (3.7)$$

O controlador que gera sua saída levando em consideração o erro, a integral do erro e a derivada do erro é o controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID). A equação (3.8) representa a forma ideal do controlador PID:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p \frac{1}{T_i} \int e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.8)$$

Aplicando a transformada de Laplace à equação (3.8), também considerando as condições iniciais nulas, obtemos a função transferência $G_c(s)$ do controle PID (equação 3.9):

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (3.9)$$

No entanto, o termo derivativo em sua forma pura não é comumente aplicado devido ao risco de amplificação de ruído, e não é facilmente implementado fisicamente. Isso ocorre porque a função de transferência teria um grau do numerador maior do que o do denominador, tornando-a impraticável. Uma solução viável é incorporar um filtro à ação derivativa, conforme indicado na equação (3.10):

$$D(s) = \frac{sT_d}{1 + \alpha sT_d} \quad (3.10)$$

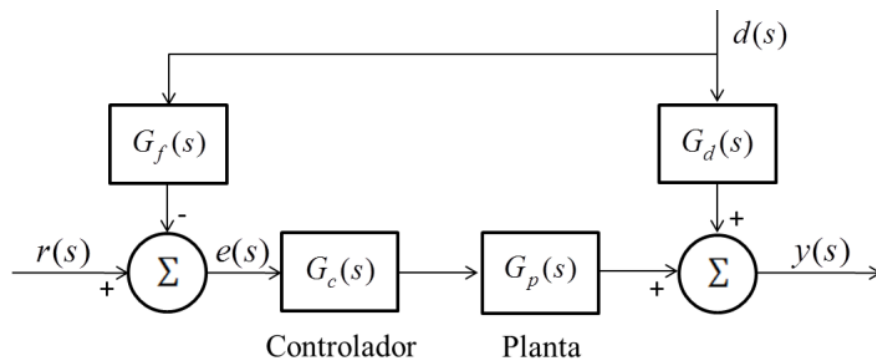
O fator α é um parâmetro que representa a contribuição do filtro à ação derivativa, costuma ser um valor pequeno em torno de 1/8 (CAMPOS, 2010). A função transferência do controlador PID com um filtro derivativo é dada pela equação (3.11):

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1 + \alpha sT_d} \right) \quad (3.11)$$

3.2.1 Controle PID Feedforward

Existem várias técnicas de mitigação de distúrbios empregadas em projetos de controle. Entre elas, destaca-se a técnica de *feedforward*. O controle por meio da ação *feedforward* é uma estratégia de controle antecipatório, na qual um distúrbio específico é medido e, por meio de uma função de transferência adequada, é aplicado antes do ponto de comparação com o sinal de entrada, evitando que o distúrbio cause efeitos indesejáveis na saída do processo. Em outras palavras, o elemento *feedforward* recebe o sinal de perturbação e executa ações de controle preventivas para compensar o efeito do distúrbio (MAYA e LEONARDI, 2011). O esquema de um controle feedforward é mostrado na Figura 3.11:

Figura 3.11 - Esquema de ação de controle feedforward.



Fonte: Adaptado de Maya e Leonardi (2011).

onde:

G_p representa a função de transferência da planta;

G_c a função de transferência do controlador feedback;

G_f a função de transferência do compensador de distúrbios (*feedforward*);

G_d representa a função de transferência do distúrbio.

A partir da simplificação do diagrama de blocos pode-se obter a equação (3.12) do controlador a ser projetado para a compensação do distúrbio:

$$G_f = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)G_c(s)} \quad (3.12)$$

O controle *feedforward*, apesar de eficaz em muitas situações, é sensível a erros de modelagem e não pode compensar distúrbios não medidos (GUIMARÃES, 2013). Essa estratégia é comumente empregada em cenários industriais que exigem

um desempenho superior, tais como o controle de variáveis como temperatura, pressão, nível, e em outros processos críticos.

3.3 Confiabilidade de Máquinas Industriais

A confiabilidade das máquinas industriais é um pilar fundamental para o funcionamento eficiente e seguro das operações industriais. A integridade e a consistência das máquinas desempenham um papel crucial na minimização de paralisações não planejadas, na otimização da produção e na garantia da segurança dos trabalhadores. Além disso, a confiabilidade também está intrinsecamente ligada à qualidade do produto, uma vez que máquinas confiáveis tendem a operar dentro dos parâmetros desejados, resultando em produtos consistentes e de alta qualidade.

Os equipamentos industriais de alta complexidade são arranjos de itens, componentes e subsistemas, com metas de desempenho, confiabilidade e manutenibilidade. Após a definição da função de cada subsistema e a especificação precisa de componentes e elementos, o engenheiro se empenha em calcular a confiabilidade esperada do sistema e identificar a contribuição relativa de cada componente para esse parâmetro crucial (LAFRAIA, 2001; ELSAYED, 1996).

De acordo com Sellito (2007), após a definição do projeto, a função da manutenção é preservar ou, em casos específicos, restaurar o desempenho original, considerando tanto custos como funcionalidade. No entanto, a capacidade da manutenção de melhorar um desempenho insatisfatório é limitada. Em estágios avançados da vida do equipamento, a expectativa de desempenho pode ser reduzida ou modificações significativas podem ser necessárias, com base na experiência adquirida ao longo do tempo. O conhecimento do estágio de vida do equipamento é fundamental para estabelecer estratégias de manutenção e gestão de ciclo de vida de equipamentos industriais complexos.

O conceito de confiabilidade é definido por Lewis (1996) como sendo a probabilidade de um dispositivo operar com desempenho satisfatório dentro de um período determinado, quando usado nas suas condições especificadas sem a ocorrência de falhas. Esta definição torna a confiabilidade uma função $R(t)$, em que o valor varia entre 0 e 1. De acordo com Eisinger e Rakowsky (2000), a confiabilidade é o principal ponto de referência para o planejamento, pois analisa previamente as

consequência e riscos envolvidos nas atividades de manutenção afim de minimizar suas ocorrências, indicando as melhores políticas de manutenção, conferindo disponibilidade, segurança e qualidade do processo.

Lafraia (2001) explica que a falha consiste na interrupção ou alteração da capacidade de um item desempenhar as funções para o qual ele foi projetado. A falha é o resultado do desvio de características além dos limites especificados, causando perda total ou parcial da função requerida do equipamento, sendo a ocorrência da falha ocasionada por diversos fatores, denominados mecanismos de falha ou modos de falhas. A complexidade do equipamento manifesta-se pelos infinitos modos de falha possíveis e pelas interferências mútuas que os modos exercem entre si.

No sentido mais amplo, a confiabilidade está associada com a segurança, com operação bem-sucedida, e com a ausência de falhas ou avarias. Por isto, em engenharia de confiabilidade o foco principal é sobre a análise de falhas e o desenvolvimento de métodos e ferramentas para a sua prevenção (LEWIS, 1996). Assim, existe uma necessidade definitiva para o estudo de confiabilidade do processo de infusão de pás eólicas, podendo influenciar positivamente os fatores críticos de sucesso, tais como inocuidade, qualidade do produto e velocidade de produção.

3.3.1 Tipos de Manutenção

A relevância da função de manutenção na consecução dos objetivos de desempenho é inegável, uma vez que desempenha um papel crucial como uma atividade interna de suporte à área de produção. Essa função tem o poder de impactar tanto de maneira direta quanto indireta em todos esses objetivos, destacando-se notavelmente na melhoria da qualidade. Conforme Moubray (2000) descreve, a evolução da prática de manutenção pode ser segmentada em diferentes gerações, delineando uma linha do tempo que está representada na Figura 3.12. Essa evolução reflete a adaptação dos conceitos fundamentais de manutenção às necessidades industriais de cada época, e como esses conceitos, posteriormente, foram categorizados. Com o avanço da evolução das práticas de manutenção em diferentes gerações, também ocorreu uma progressão dos conceitos relacionados aos tipos de manutenção mais eficazes no contexto da indústria.

Figura 3.12 - Evolução da manutenção.



Fonte: MOUBRAY (2000).

De acordo com Viana (2002), os tipos de manutenção representam as abordagens para realizar intervenções nos ativos de produção, ou seja, nos equipamentos que compõem uma determinada instalação industrial:

- **Manutenção Corretiva:** A forma mais recorrente de manutenção aplicada desde a revolução industrial. As ações corretivas têm por finalidade reestabelecer a capacidade funcional do maquinário industrial dentro dos parâmetros requeridos, após a ocorrência de falhas envolvendo a interrupção na produção. Esse tipo de manutenção impacta no custo de manutenção devido a perda de produtividade e, geralmente, envolve troca de peças, além de não eliminar a causa raiz da falha podendo esta ter a probabilidade de reincidência.
- **Manutenção Preventiva:** Esse tipo de manutenção, ao contrário da corretiva, visa evitar a falha do equipamento. É realizada em equipamentos que não estejam em falha, ou seja, ainda estejam operando com um mínimo de condições. A preventiva obedece a um plano previamente elaborado baseado em intervalos definidos de tempo. Para Edwards *et al* (1998), um programa de manutenção preventiva eficaz alcança o aumento de disponibilidade e confiabilidade do sistema produtivo.
- **Manutenção Preditiva:** Esse tipo de manutenção é uma preventiva baseada na condição do equipamento. Permite o acompanhamento de variáveis ou parâmetros através de medições realizadas quando ele estiver em pleno funcionamento, o que possibilita uma maior disponibilidade. Assim, a execução de reparo e/ou conserto ocorre em um momento ideal pré-determinado,

utilizando o máximo da vida operacional do elemento de máquina e evitando a intervenção de conserto desnecessária no maquinário. Segundo Edwards *et al* (1998), as técnicas de manutenção preditiva oferecem informações valiosas em relação ao estado de funcionamento e conservação do maquinário. Apesar do custo inicial de investimento em instrumentos e mão-de-obra qualificada, a viabilidade financeira de monitoramento do estado de operação do equipamento visa reduzir os custos de manutenção.

Esses tipos de manutenção oferecem abordagens distintas para garantir a integridade dos ativos industriais, com implicações diretas nos custos, na disponibilidade e na confiabilidade do sistema produtivo.

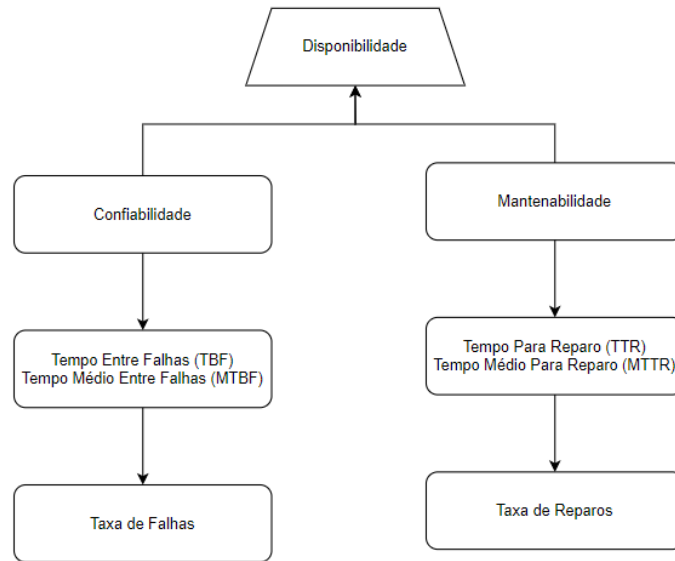
3.3.2 Distribuição Exponencial

Ao iniciar qualquer estudo de confiabilidade de máquinas e equipamentos é fundamental analisar a tendência das falhas ocorridas e tempo de operação desses. A distinção entre o maquinário industrial como reparável ou não reparável direciona a escolha da metodologia estatística apropriada para examinar o comportamento das falhas e, conseqüentemente, para calcular os índices relacionados à confiabilidade do sistema industrial.

Sistemas reparáveis são aqueles sujeitos a manutenção preventiva, corretiva ou preditiva, e essas estratégias afetam diretamente os intervalos de tempo entre as falhas. Ao analisar esses valores, é possível compreender o padrão de ocorrência das falhas, identificando se há um aumento ou diminuição na disponibilidade do sistema. Em contrapartida, sistemas não reparáveis são descartados e substituídos por novos componentes quando ocorrem falhas. Para avaliar a confiabilidade desses sistemas, utiliza-se a métrica do tempo até a falha (TTF – *Time to Failure*), representando a probabilidade de sobrevivência ao longo de um período específico de sua vida útil (DIAS e PEREIRA, 2005; MODARRES,1992).

A disponibilidade da máquina sofre influência significativa dos índices de confiabilidade e manutenibilidade. Esses últimos estão intrinsecamente ligados aos indicadores operacionais que medem os intervalos de tempo entre falhas (*Time Between Failure – TBF*) e o tempo para reparos (*Time to Repair – TTR*). A relação entre estes indicadores é representada na Figura 3.13:

Figura 3.13 - Relação da confiabilidade e manutenibilidade com a disponibilidade de máquinas.



Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009).

A determinação da função de confiabilidade se baseia na modelagem dos tempos até a falha de um equipamento em estudo, utilizando uma distribuição de probabilidade. As funções mais amplamente empregadas na análise de confiabilidade compreendem a função de densidade de falhas $f(t)$, a função acumulada de falhas $F(t)$, a função de confiabilidade $R(t)$, e a função de taxa de falha $h(t)$. Fogliatto e Ribeiro (2009) descrevem as expressões apresentadas a seguir.

A função de densidade de falhas $f(t)$ descreve a taxa de variação da probabilidade de ocorrência de falhas em relação à unidade de tempo. Essa função é usualmente representada por meio de uma função de distribuição de probabilidade conforme a equação (3.22):

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3.22)$$

A função acumulada de falhas $F(t)$ da equação (3.23) estima a probabilidade de que uma falha ocorra em um intervalo de tempo entre t_1 e t_2 :

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (3.23)$$

A função confiabilidade $R(t)$ representa a probabilidade de não ocorrer falhas em um determinado período, como mostra a equação (3.24):

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - \int_{-\infty}^t f(t) dt = 1 - F(t) \quad (3.24)$$

Já a função densidade de falha $h(t)$ mostrada na equação (3.25) é a probabilidade condicional de que ocorra a falha no intervalo de t a $t + \Delta t$, considerando que não houve falha em t :

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (3.25)$$

Kardec e Nascif (2009) categorizam o Tempo Médio Entre Falhas (*Mean Time to Repair – MTBF*) como um indicador fundamental da confiabilidade de itens passíveis de reparo e, em linhas gerais, representa a média da vida útil de uma população a partir da equação (3.26):

$$MTBF = \frac{\sum \text{Tempo Entre Falhas}}{\sum \text{Número de Falhas}} \quad (3.26)$$

A função de distribuição mais utilizada para modelar a confiabilidade de um componente ou equipamento é a distribuição exponencial. Isso ocorre por ser uma função relativamente simples e porque se assemelha bastante ao comportamento do componente durante seu ciclo de vida útil. A forma geral da distribuição exponencial é dada pela equação (3.27) (NACHLAS, 2017):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.27)$$

Onde λ representa a taxa de falhas do equipamento e pode ser calculada pela equação (3.28):

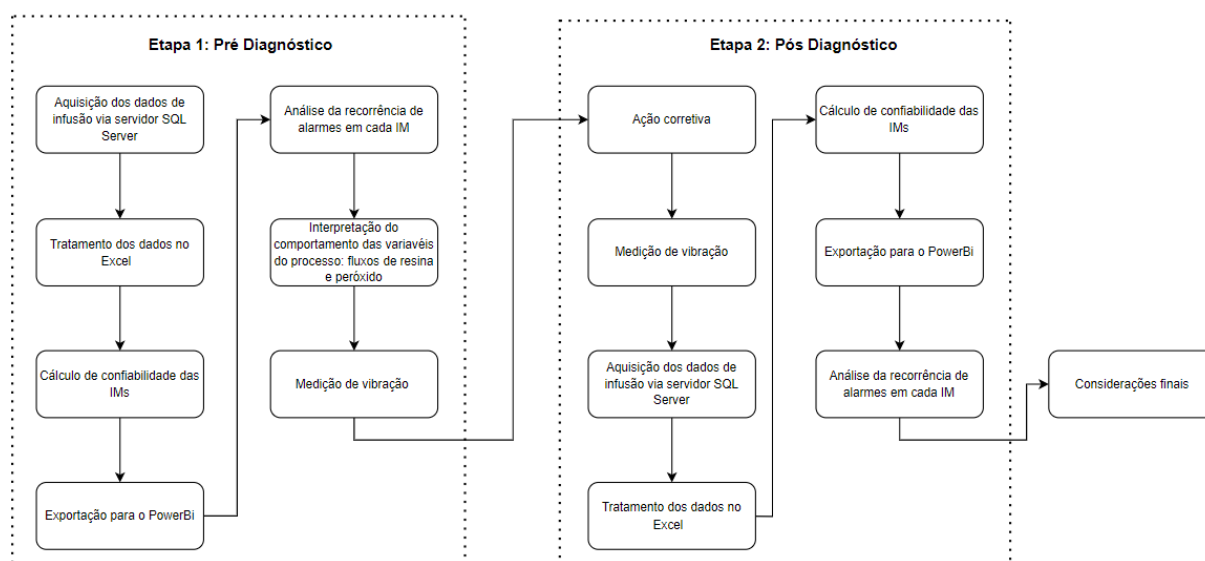
$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (3.28)$$

O principal determinante da confiabilidade de um equipamento é a frequência das falhas, a qual é calculada por meio da média aritmética dos intervalos de tempo entre falhas consecutivas observadas durante a operação do equipamento sob uma condição de estresse específica, fornecendo o MTBF. Geralmente, equipamentos mais confiáveis apresentam um MTBF mais elevado, expresso em unidades de horas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão tratados a máquina e os materiais empregados ao longo de todo o trabalho, fornecendo, ademais, uma análise detalhada dos alarmes associados à máquina de infusão. O estudo em questão foi dividido em duas etapas: pré diagnóstico e pós diagnóstico. O fluxograma da Figura 4.1 fornece a ordem e os detalhes que balizaram cada uma delas.

Figura 4.1 - Metodologia geral do estudo.



Fonte: Autoria própria.

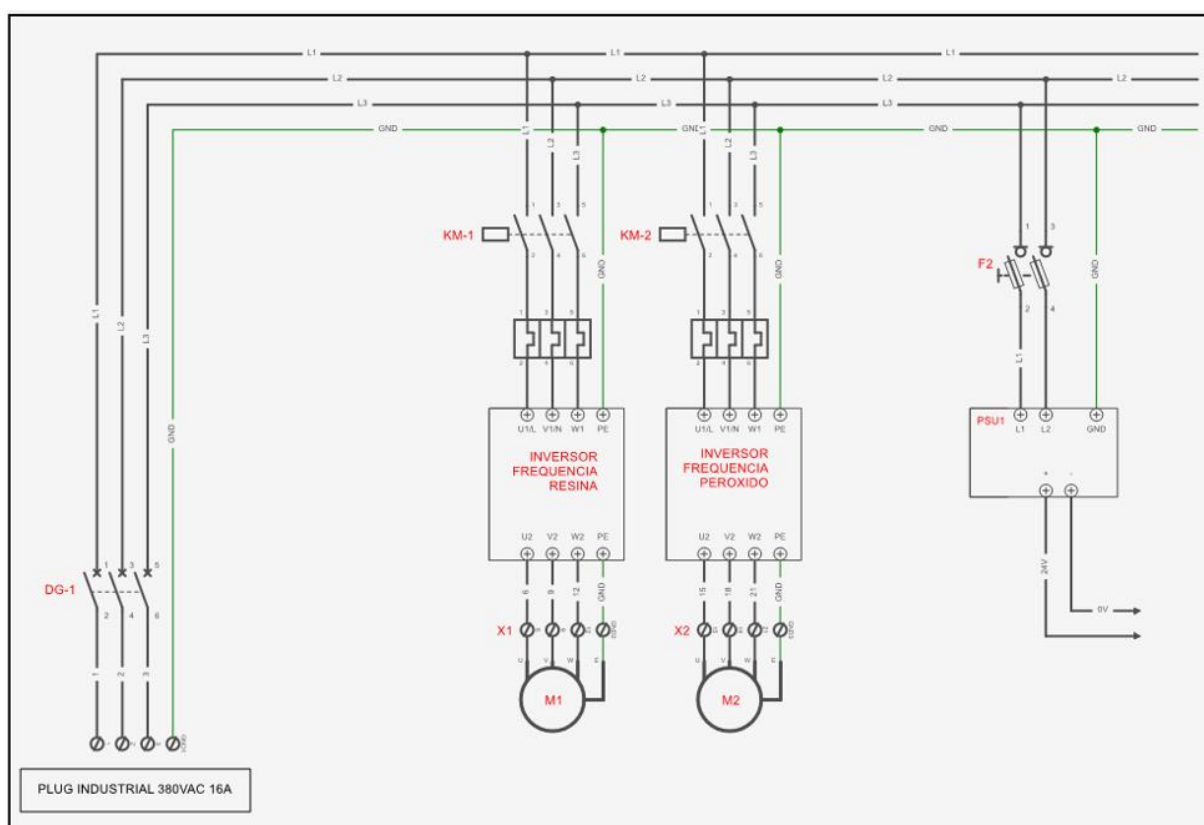
Essa abordagem segmentada tem como propósito possibilitar uma visualização clara dos efeitos decorrentes das ações corretivas adotadas, permitindo, assim, uma avaliação precisa do impacto no processo de infusão.

4.1 Máquina de Infusão

A máquina de infusão é um equipamento eletromecânico utilizado no processo de injeção de componentes químicos no interior das pás eólicas. Com uma constituição robusta, ela abriga um sistema de instrumentação avançado encarregado de controlar duas bombas de vazão, responsáveis pelo bombeamento preciso de resina e peróxido. Esses parâmetros, tais como vazão, proporção, pressão, temperatura, mistura e outros critérios de engenharia, são predefinidos por meio de uma receita específica, utilizando a interface homem-máquina (IHM).

A máquina é energizada por um sistema elétrico trifásico, conectado por meio de um plug industrial de 10 pinos, com o seccionamento geral realizado por uma chave rotativa seccionadora, equipada com mecanismo de bloqueio. Internamente, a máquina é constituída por dois circuitos principais: um de força e outro de comando. O circuito de força alimenta o disjuntor geral, o qual fornece energia aos disjuntores dos motores. Estes, por sua vez, alimentam os contactores de segurança, responsáveis por acionar os inversores de frequência para resina e peróxido. Estes últimos, por fim, alimentam as bombas de resina e peróxido. Já os componentes de controle, são alimentados por 24VCC/2A, oriundos da fonte de comando. O diagrama de força da IM é apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Diagrama de força da máquina de infusão.

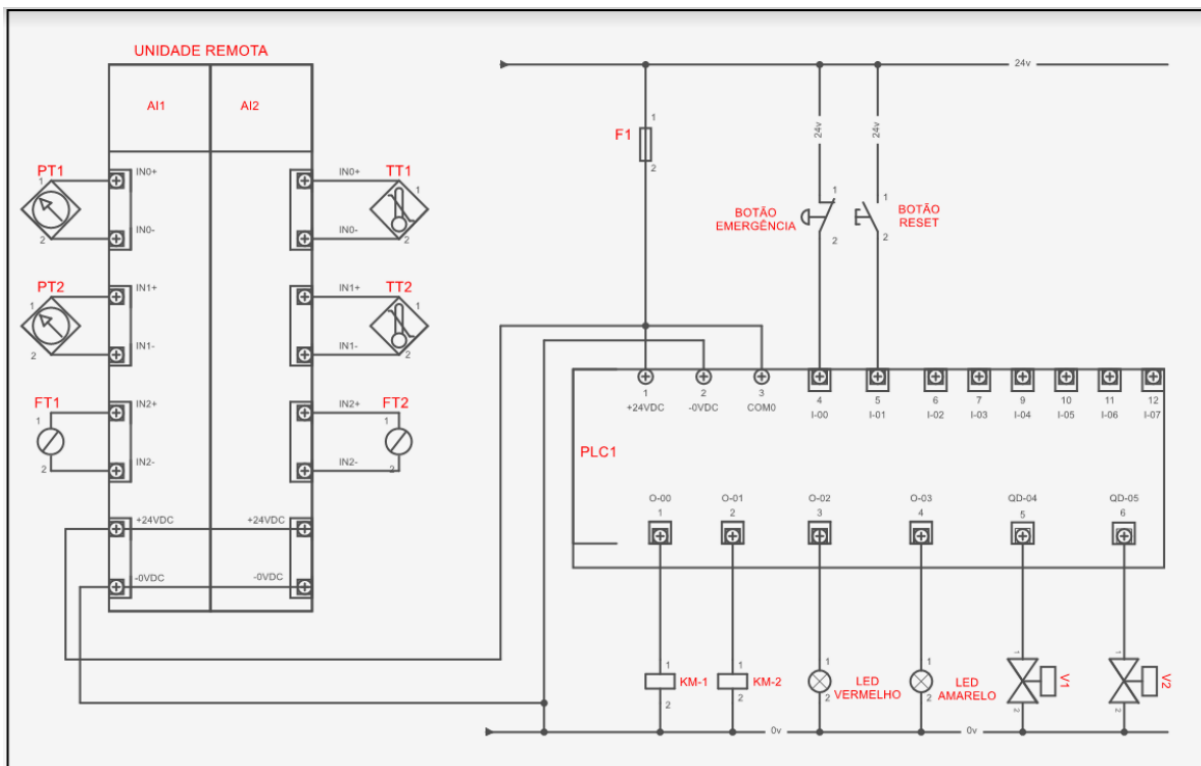


Fonte: Autoria própria.

O sistema de controle (Figura 4.3) é gerenciado por um Controlador Lógico Programável (CLP), que incorpora duas entradas digitais para os botões de emergência e *reset*. Os sensores de pressão, fluxo e temperatura da linha de resina e peróxido são interconectados a uma unidade remota, que desempenha a função de entradas analógicas. Adicionalmente, as saídas do CLP estão vinculadas aos contactores das bombas de resina e peróxido, aos LEDs indicativos de alarme e a válvulas eletropneumáticas que garantem o bloqueio da passagem de resina e

peróxido quando necessário. Os dados de referência dos componentes da máquina de infusão estão apresentados no Quadro 4.1.

Figura 4.3 – Sistema de controle da máquina de infusão.



Fonte: Autoria própria.

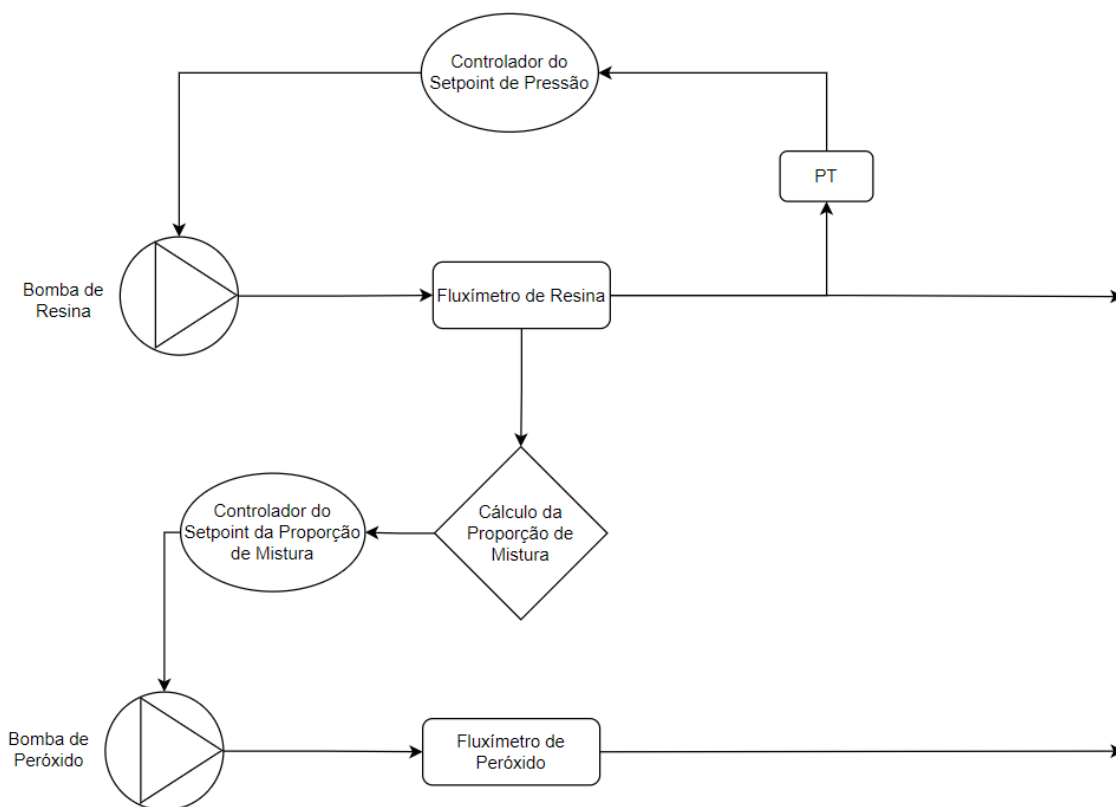
Quadro 4.1 - Especificações técnica da máquina de infusão.

Descrição	Alcance	Unidade
Proporção de mistura	1 – 2,4	%
Capacidade do fluxo de resina	2 – 25	Kg/min
Capacidade do fluxo de peróxido	0,02 – 0,6	Kg/min
Capacidade do tanque de peróxido	15	L
Pressão no <i>manifold</i>	-0,25 – 0,5	Bar
Pressão da resina após a bomba	0 – 40	Bar
Pressão do peróxido após a bomba	0 – 40	Bar
Fornecimento de energia	380VAC/60Hz/16A	-
Temperatura de trabalho	10 – 50	°C

Fonte: Autoria própria.

A principal função da máquina de infusão reside em sua capacidade de controlar com precisão a proporção da mistura entre resina e peróxido. Os dados fornecidos pelos PTs no molde são essenciais para calcular as taxas de fluxo das bombas de resina e peróxido, como representado na Figura 4.4.

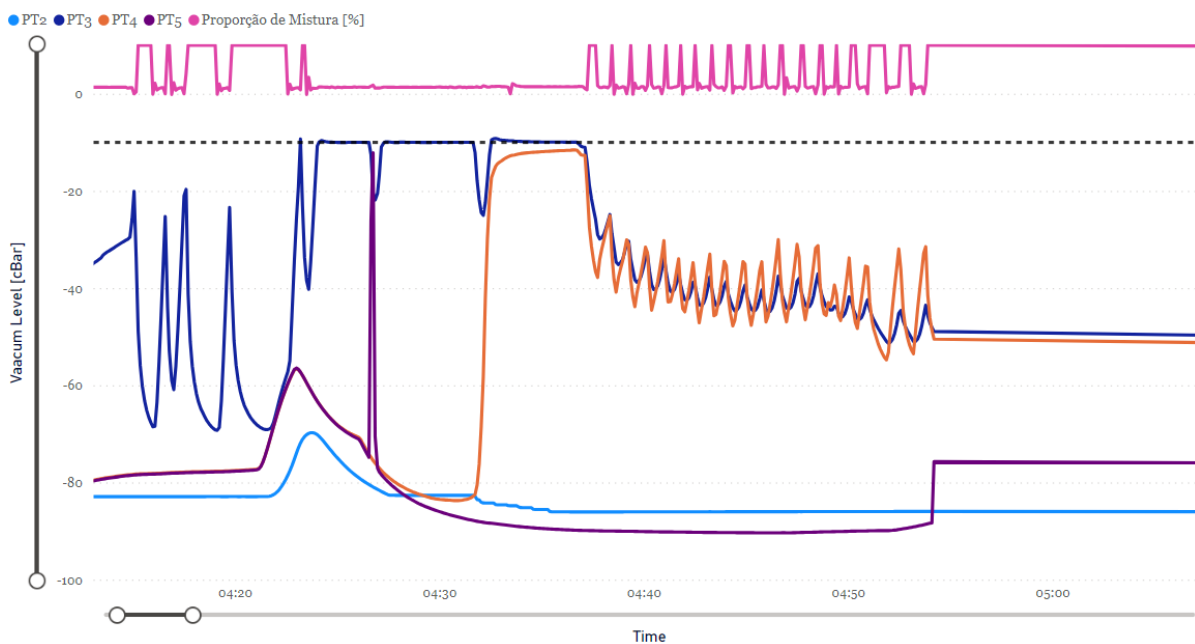
Figura 4.4 - Diagrama de regulação de pressão.



Fonte: Autoria própria.

A relação entre a pressão registrada no molde e a proporção da mistura é nitidamente evidente durante uma infusão, conforme demonstrado na Figura 4.5.

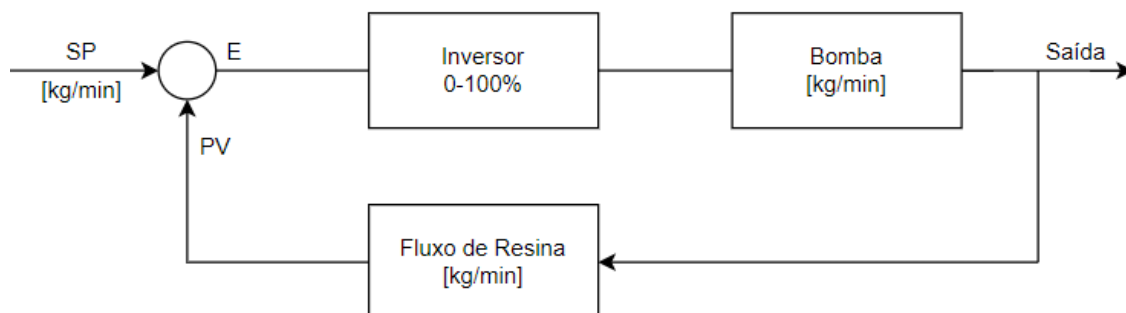
Figura 4.5 - Relação da pressão no molde e a proporção de mistura.



Fonte: Autoria própria.

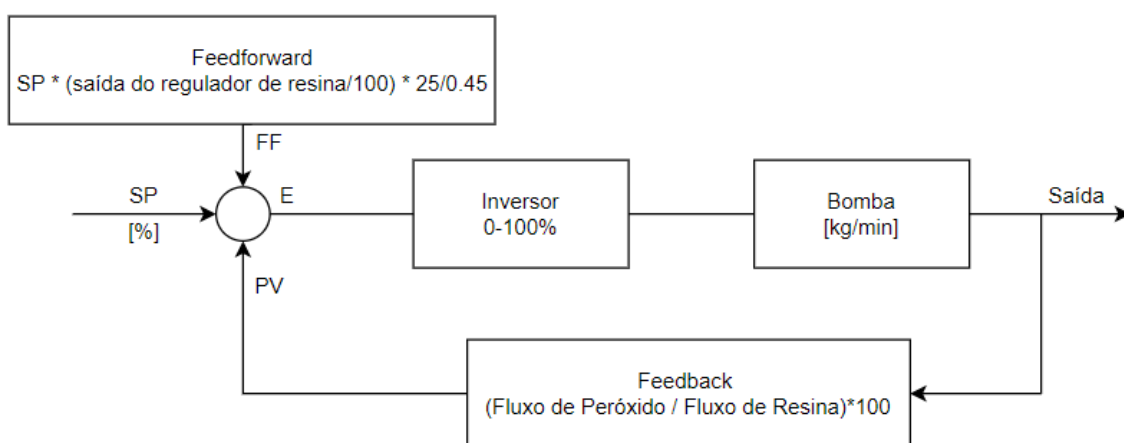
A máquina deve ter a capacidade de regular a taxa de fluxo da resina em cada ponto de injeção usando o *feedback* dos PTs internos sob o saco de vácuo (Figura 4.6), enquanto a bomba de peróxido acompanha o ponto de ajuste da proporção de mistura, de acordo com a regulagem da bomba de resina, seguindo o controle PID *feedforward* (Figura 4.7).

Figura 4.6 - Controle PID da bomba de resina.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.7 - Controle PID da bomba de peróxido.



Fonte: Autoria própria.

O cálculo do para o *feedforward* para o caso sob estudo no trabalho considera a regulação máxima de saída da bomba de peróxido como 0,45 kg/min e da bomba de resina como 25 kg/min. Esse controle preciso é essencial para garantir que a composição química adequada seja alcançada durante o processo, sendo vital para prevenir cenários nos quais a casca receba exclusivamente resina ou peróxido. Isto poderia resultar em defeitos de infusão com alto custo associado aos reparos, atrasos e/ou descarte do compósito.

4.2 Alarmes de Infusão

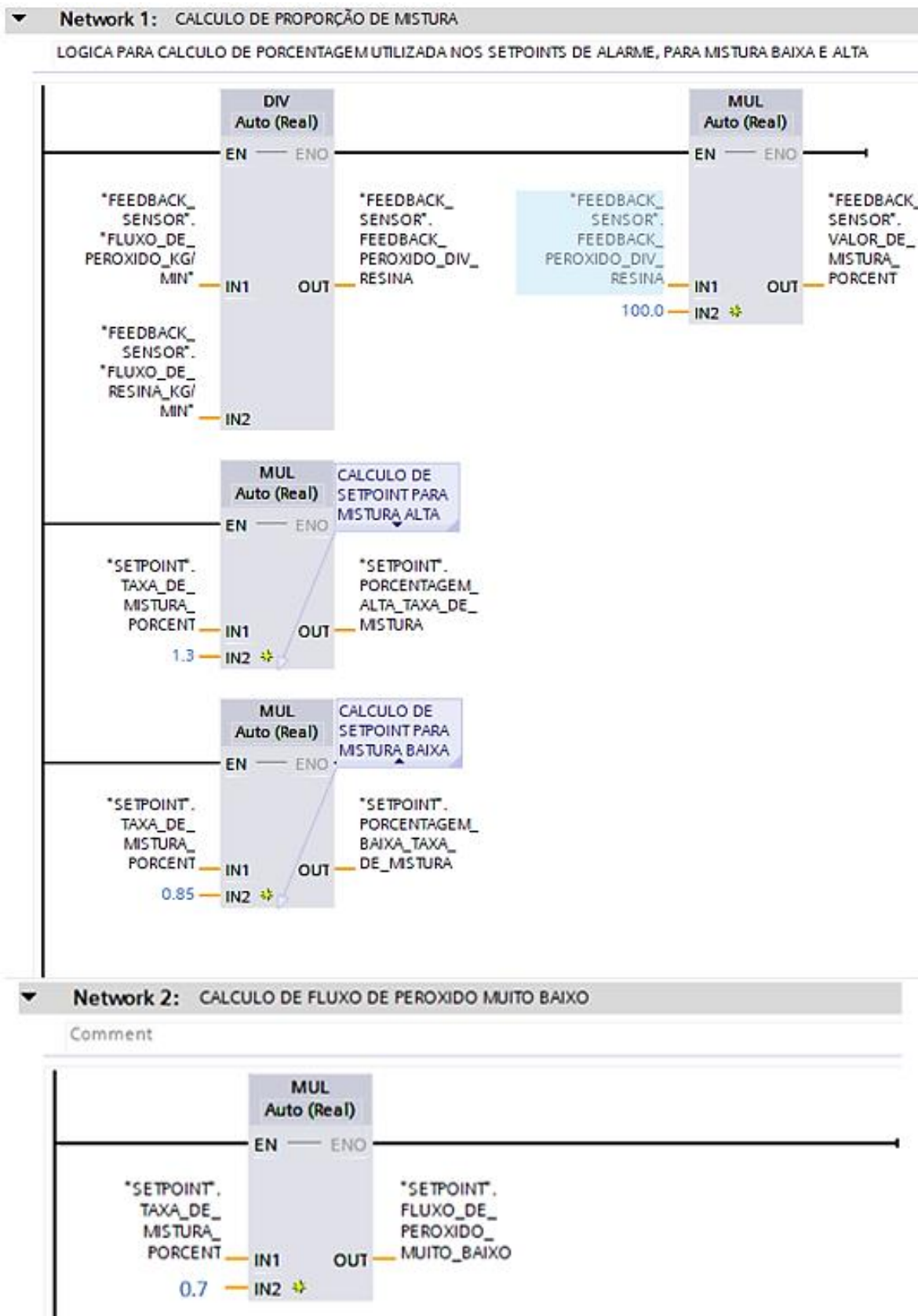
Os alarmes nas máquinas de infusão de pás eólicas têm uma função significativa na garantia da qualidade do compósito e na eficiência do processo. Esses sistemas de alarme, ao identificarem anomalias ou falhas em tempo real, desempenham um papel crucial na prevenção de defeitos, especialmente considerando o alto valor agregado associado aos reparos ou ao descarte total da pá (*scraps*), tanto em termos de custo quanto de tempo de entrega. Além disso, os alarmes contribuem significativamente para otimizar os procedimentos de manutenção, o que permite intervenções mais precisas e econômicas e, por conseguinte, reduz o tempo de inatividade da máquina, maximizando a produção de pás eólicas.

Os alarmes são categorizados em dois níveis, variando de acordo com a gravidade:

- Nível 1 (Sinalizado por luz vermelha) – é um alarme crítico que desliga as bombas e interrompe temporariamente a infusão;
- Nível 2 (Sinalizado por luz amarela) – é um alarme não crítico que apenas alerta o operador, não interrompendo a infusão.

Os alarmes de nível 1 mais frequentes nas máquinas de infusão serão apresentados a seguir. Contudo, é importante destacar que a ativação de qualquer alarme está vinculada à violação de um valor de referência predefinido, conhecido como *setpoint*. No contexto das máquinas de infusão, esses *setpoints* são determinados pela engenharia de processo. A lógica estabelecida para cálculo e, por conseguinte, determinação dos *setpoints* dos principais alarmes é ilustrada na Figura 4.8.

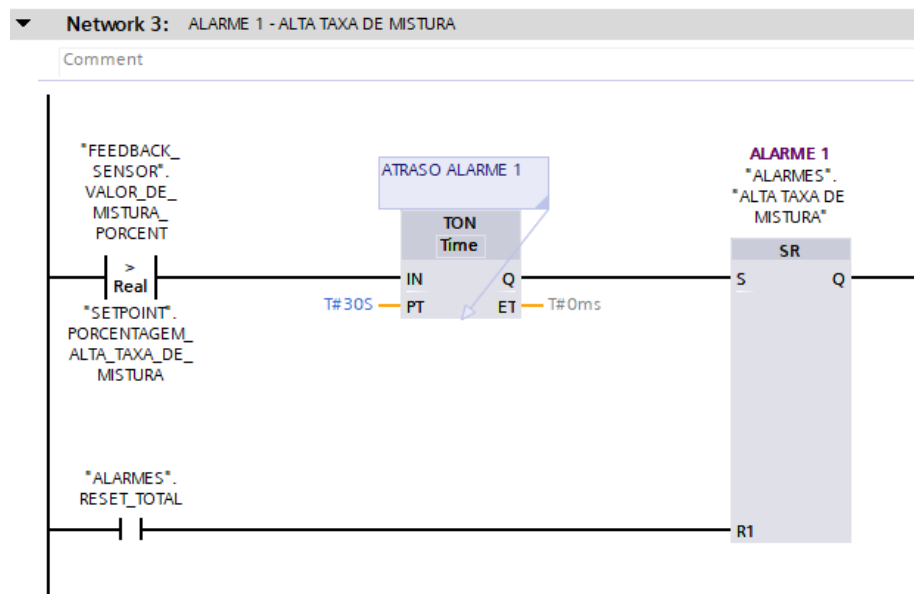
Figura 4.8 – Lógica para cálculo de setpoints para alarmes de nível 1 em Ladder.



Fonte: Autoria própria.

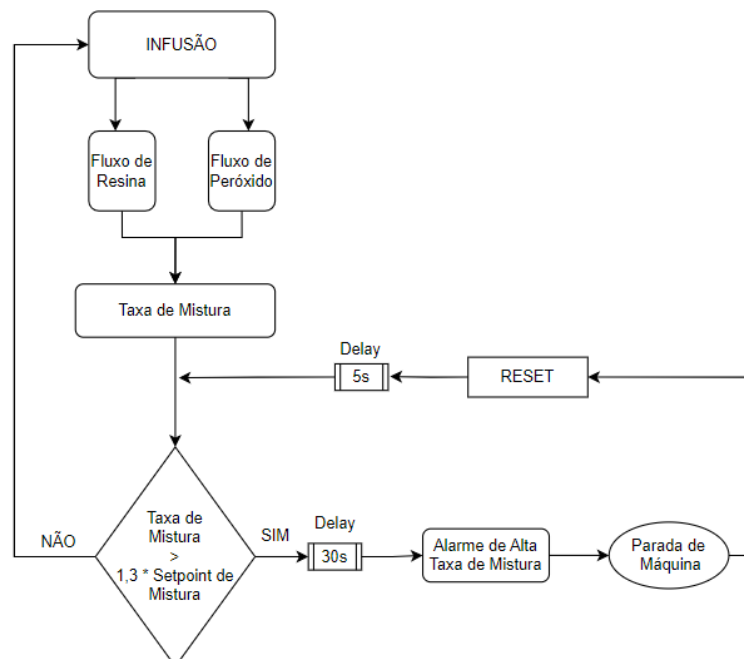
- Alarme 1 - Alta Taxa de Mistura:** Esse alarme é provocado quando a vazão de resina fica abaixo do esperado, resultando em uma proporção de mistura ($P = \text{Fluxo de Peróxido} / \text{Fluxo de Resina}$) maior do que o valor do *setpoint*. Quando essa proporção excede 30% acima do *setpoint* por um período de 30 segundos, o alarme é ativado e a infusão é interrompida até que o problema seja resolvido (Figuras 4.9 e 4.10).

Figura 4.9 - Alarme 1: Alta taxa de mistura em Ladder.



Fonte: Autoria própria.

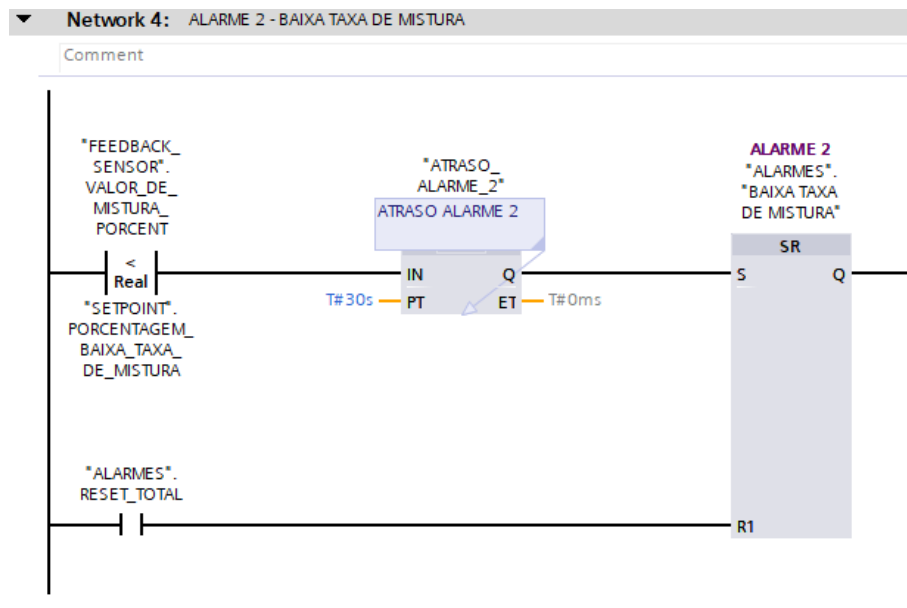
Figura 4.10 - Diagrama do Alarme 1: Alta taxa de mistura.



Fonte: Autoria própria.

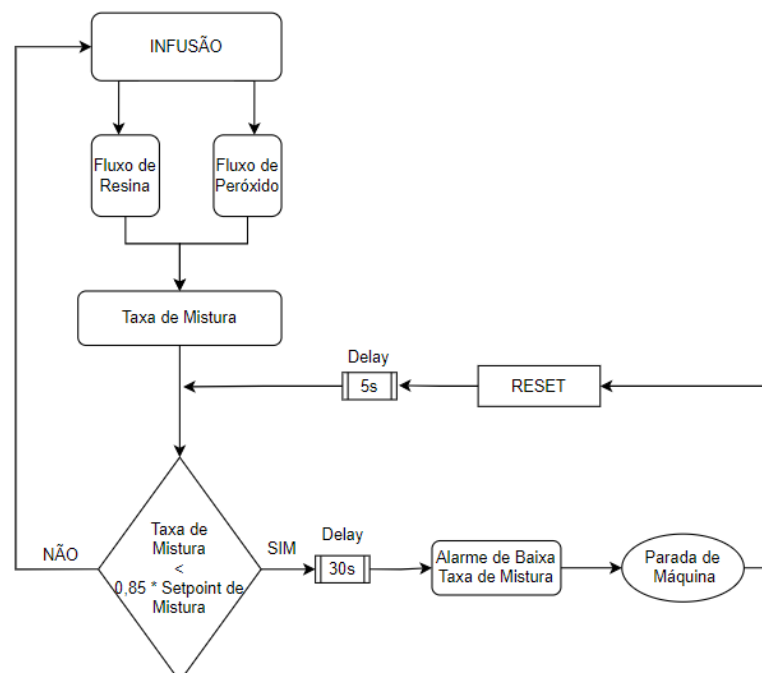
- Alarme 2 - Baixa Taxa de Mistura:** É provocado quando a vazão de peróxido fica abaixo do esperado, resultando em uma proporção de mistura ($P = \text{Fluxo de Peróxido} / \text{Fluxo de Resina}$) inferior ao valor do *setpoint*. Quando essa proporção fica abaixo de 15% do *setpoint* por um período de 30 segundos, o alarme é ativado e a infusão é interrompida até que o problema seja resolvido (Figuras 4.11 e 4.12).

Figura 4.11 - Alarme 2: Baixa taxa de mistura em Ladder.



Fonte: Autoria própria.

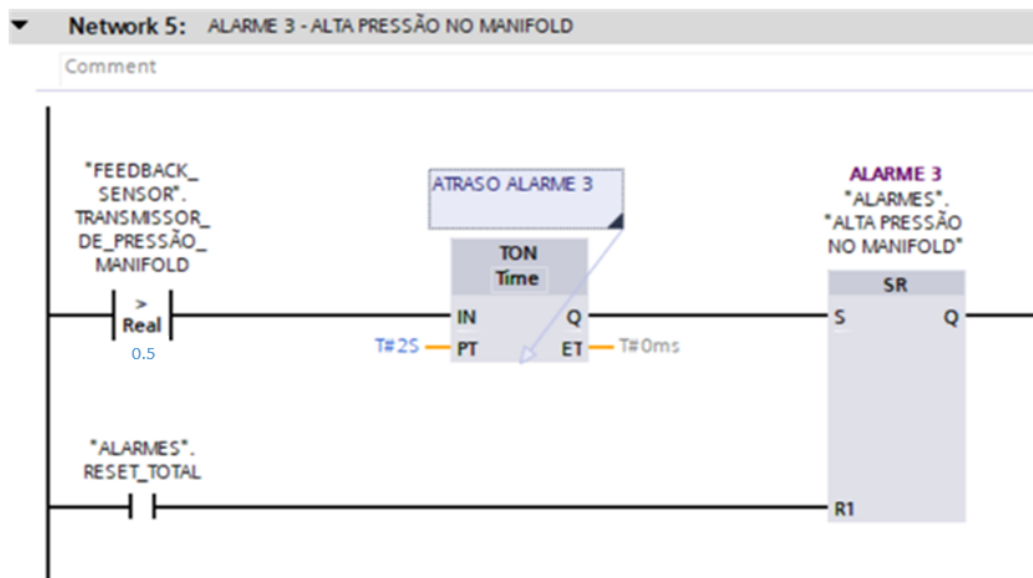
Figura 4.12 - Diagrama do Alarme 2: Baixa taxa de mistura.



Fonte: Autoria própria.

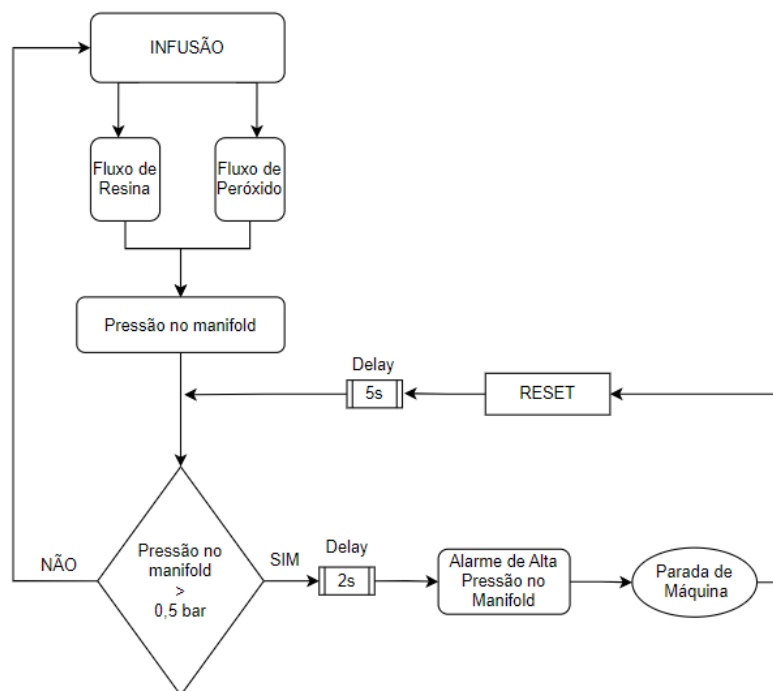
- Alarme 3 – Alta Pressão no Manifold:** O alarme é ativado quando a pressão, registrada pelo transmissor de pressão localizado no interior *manifold*, excede 0,5 bar por um período superior a 2 segundos. Nesse contexto, a infusão é interrompida até que o problema seja resolvido (Figuras 4.13 e 4.14).

Figura 4.13 - Alarme 3: Alta pressão no manifold em Ladder.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.14 - Diagrama do alarme 3: Alta pressão no manifold.

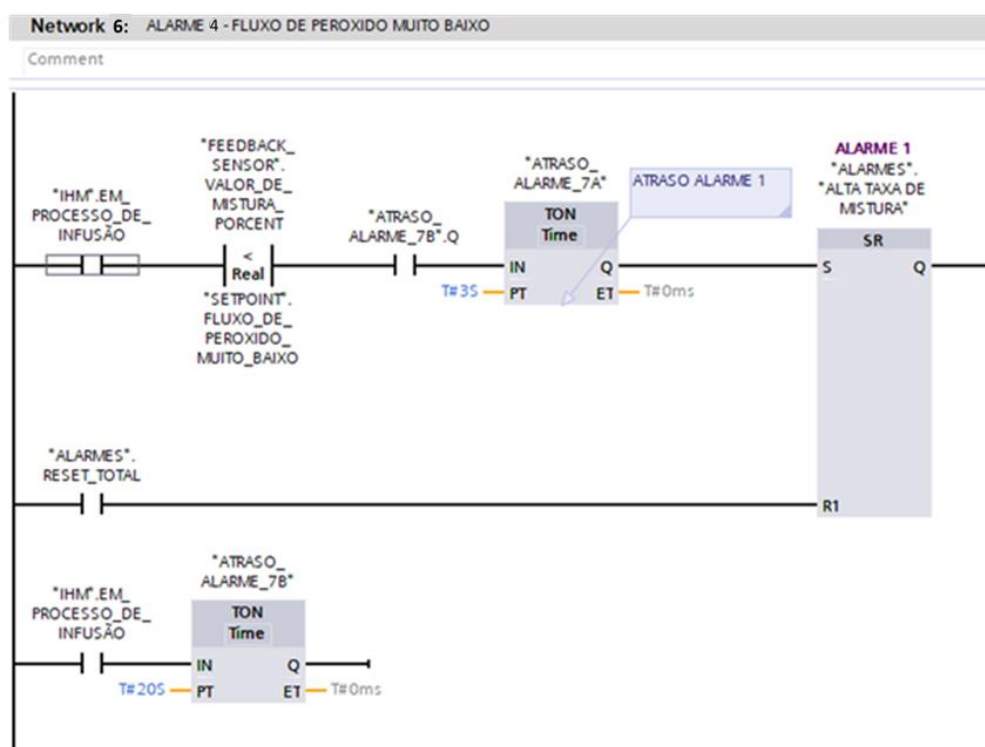


Fonte: Autoria própria.

- Alarme 4 – Fluxo de Peróxido Muito Baixo:** Assim como o Alarme de Baixa Taxa de Mistura (Alarme 2), o Alarme 4 é desencadeado quando a vazão de peróxido está aquém do esperado, e a proporção de mistura ($P = \text{Fluxo de Peróxido} / \text{Fluxo de Resina}$) fica abaixo do valor do *setpoint*, mas sob condições distintas. Este alarme é ativado quando a proporção de mistura permanece abaixo de 30% do valor de *setpoint* durante um período de 3 segundos, levando à interrupção da infusão até que o problema seja resolvido. Além disso, a IM só habilita este alarme após 20 segundos do início da infusão, garantindo que a possível presença de bolhas na linha de peróxido no início da infusão não prejudique o processo (Figuras 4.15 e 4.16).

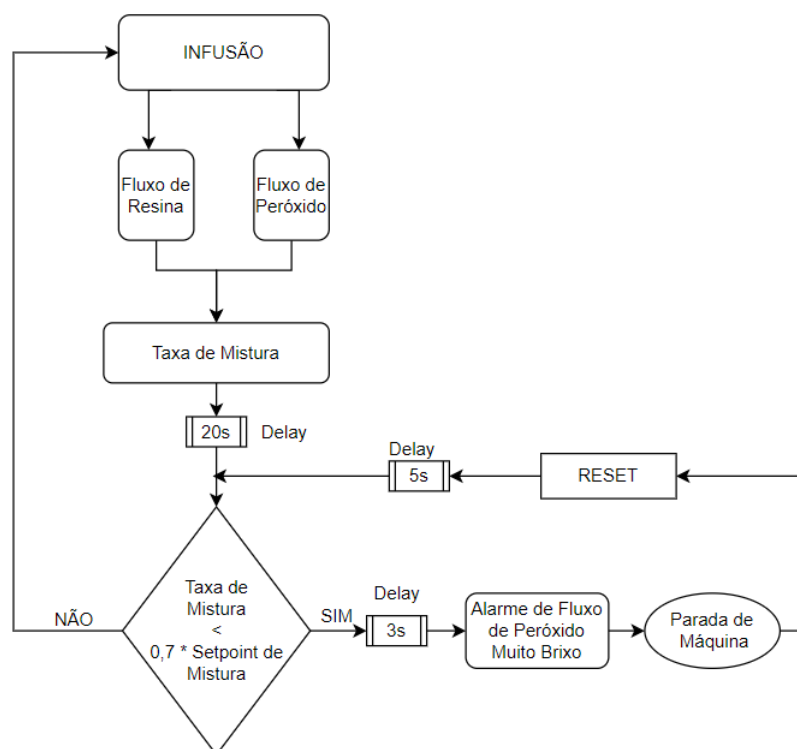
Embora desempenhem funções similares, o Alarme 2 possui critérios de *setpoint* mais rigorosos (15%). Em contrapartida, o Alarme 4 oferece uma margem de flexibilidade maior em relação ao valor do *setpoint* (30%). No entanto, é importante observar que o Alarme 4 tem um *delay* extremamente curto. Isso se deve ao risco associado à possibilidade de a pá eólica receber uma quantidade significativa de resina em alta vazão sem peróxido por mais de 3 segundos, o que poderia resultar em defeitos de laminado não curado e, em casos mais graves, a necessidade de *scrap*.

Figura 4.15 - Alarme 4: Fluxo de Peróxido Muito Baixo em Ladder



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.16 - Diagrama do Alarme 4: Fluxo de peróxido muito baixo.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Dados de Confiabilidade

Para realizar uma análise de confiabilidade de uma máquina, é crucial obter dados precisos e confiáveis relacionados ao seu histórico de desempenho. Isso envolve coletar informações sobre o tempo de operação da máquina ao longo do período de interesse, o número de interrupções devido a mau funcionamento e o tempo necessário para realizar esses reparos. No contexto em análise, esses dados são adquiridos através da coleta de informações provenientes do CLP da máquina e, posteriormente, armazenados no SQL Server, onde podem ser acessados por meio de arquivos *Extensible Markup Language* (XML).

No servidor das máquinas de infusão estão disponíveis todos os parâmetros do processo, incluindo informações como o tempo de infusão, variação de pressão, fluxo, temperatura, proporção de mistura, quantidade de válvulas usadas e o registro de paradas devido a alarmes. Com base nesses dados, foi conduzido um processo de análise para seis máquinas de infusão, visando a realização de um estudo de confiabilidade para esses equipamentos. Os dados obtidos durante um período de 30

dias e usados como pivô para o estudo de confiabilidade são apresentando nos Quadros 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7:

Quadro 4.2 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 1 (IM1).

IM 1			
Infusão	Tempo de Infusão (min)	Nº de Alarmes	Tempo de Reparo (s)
1	116	1	61
2	119	0	0
3	107	4	145
4	97	0	0
5	68	31	761
6	104	0	0
7	119	10	272
8	118	16	804
9	119	20	508
10	106	0	0
11	136	3	148
12	106	6	255
13	85	0	0
14	173	39	901
15	139	0	0
16	144	1	13
17	102	2	19
18	100	0	0
19	102	1	20
20	102	0	0
21	121	0	0
TOTAL	2383	134	3907

Fonte: Autoria própria.

Quadro 4.3 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 2 (IM2).

IM 2			
Infusão	Tempo de Infusão (min)	Nº de Alarmes	Tempo de Reparo (s)
1	122	1	296
2	114	2	24
3	133	1	68
4	124	2	82
5	125	2	13
6	151	3	127
7	133	0	0
8	122	15	118
9	125	17	431
10	112	6	220
11	124	6	1009
12	144	6	23
TOTAL	1529	61	2411

Fonte: Autoria própria.

Quadro 4.4 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 3 (IM3).

IM 3			
Infusão	Tempo de Infusão (min)	Nº de Alarmes	Tempo de Reparo (s)
1	126	0	0
2	130	0	0
3	112	0	0
4	112	0	0
5	101	1	6
6	134	0	0
7	135	0	0
8	117	0	0
9	130	0	0
10	118	8	232
11	115	0	0
12	109	0	0
13	127	0	0
14	44	0	0
15	83	0	0
TOTAL	1693	9	238

Fonte: Autoria própria.

Quadro 4.5 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 4 (IM4).

IM 4			
Infusão	Tempo de Infusão (min)	Nº de Alarmes	Tempo de Reparo (s)
1	107	0	0
2	139	1	27
3	87	0	0
4	115	0	0
5	120	2	6
6	101	0	0
7	102	0	0
8	87	0	0
9	108	0	0
10	104	0	0
11	106	0	0
12	125	0	0
13	99	0	0
14	90	0	0
TOTAL	1490	3	33

Fonte: Autoria própria.

Quadro 4.6 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 5 (IM5).

IM 5			
Infusão	Tempo de Infusão (min)	N° de Alarmes	Tempo de Reparo (s)
1	143	0	0
2	22	0	0
3	173	0	0
4	112	0	0
5	91	0	0
6	95	0	0
7	168	0	0
8	108	2	93
9	115	0	0
10	113	0	0
11	113	0	0
12	110	0	0
13	126	0	0
14	126	0	0
15	91	0	0
16	108	0	0
17	96	0	0
TOTAL	1910	2	93

Fonte: Autoria própria.

Quadro 4.7 - Dados de Processo da Máquina de Infusão 6 (IM6).

IM 6			
Infusão	Tempo de Infusão (min)	N° de Alarmes	Tempo de Reparo (s)
1	115	0	0
2	132	0	0
3	124	0	0
4	140	0	0
5	120	0	0
6	162	0	0
7	122	0	0
8	125	0	0
9	183	0	0
10	120	0	0
11	131	0	0
12	127	0	0
13	127	0	0
14	120	0	0
15	123	0	0
16	118	0	0
17	112	0	0
18	115	0	0
TOTAL	2316	0	0

Fonte: Autoria própria.

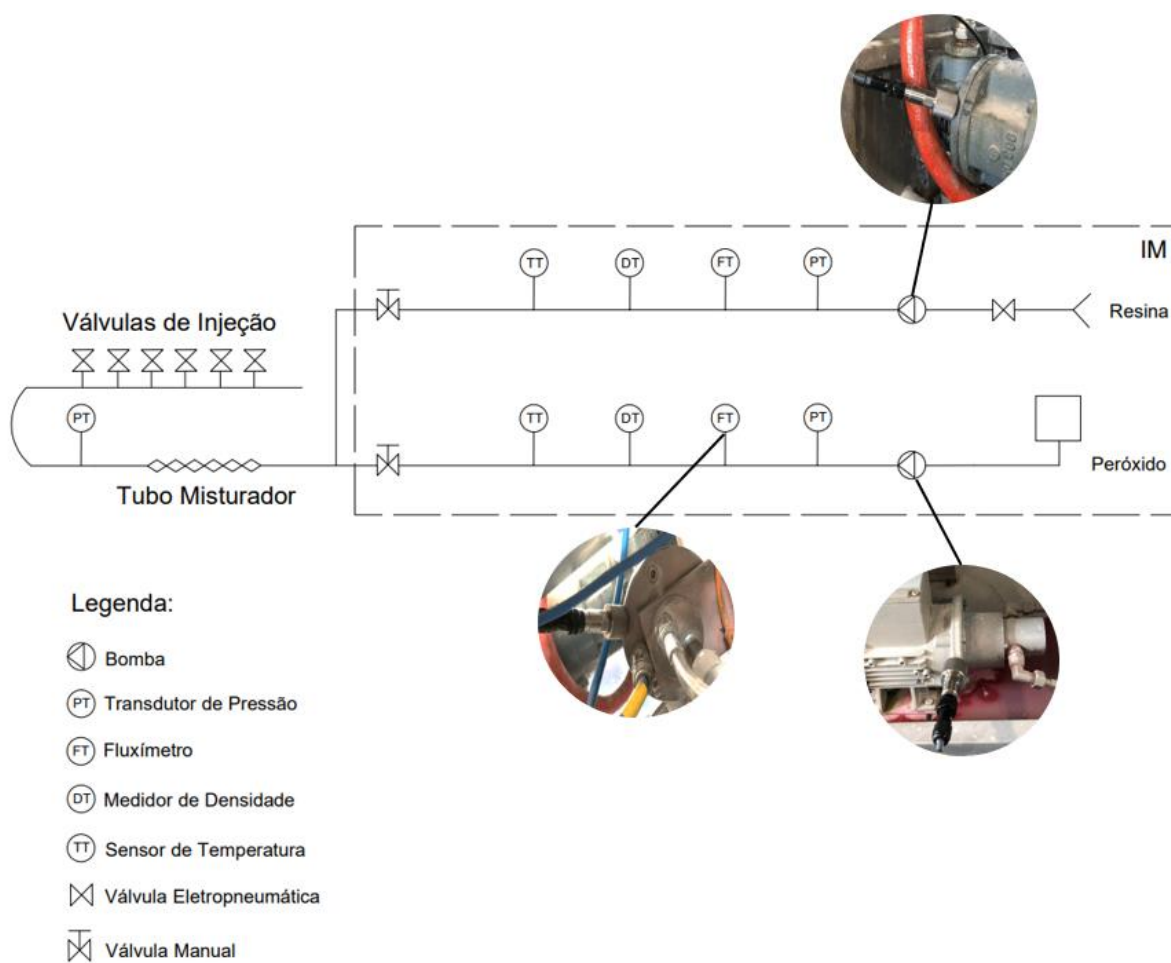
A partir dos dados, nota-se que existem grandes variações entre as IMs no que tange ao número de alarmes e tempo de reparo, as IMs 1 e 2 tiveram tempo de infusão similares durante o período de 30 dias, contudo, o número de alarmes e tempo de reparo de ambas são completamente diferentes, o que influenciará diretamente na confiabilidade de cada uma delas. Os dados foram processados para calcular os valores de MTBF, taxa de falhas e confiabilidade em 2 horas (tempo médio de uma infusão) por meio da ferramenta Excel. Para uma visualização mais detalhada e a aplicação dos filtros necessários nos gráficos, optou-se pelo uso do PowerBI. Essa abordagem permitiu uma análise mais robusta e flexível dos dados, garantindo uma compreensão abrangente do desempenho da máquina ao longo do tempo.

4.4 Análise de Vibração

A análise de vibração em máquinas é uma técnica importante para monitorar o estado de equipamentos e identificar potenciais problemas. Para conduzir esse estudo, se faz necessário o uso de um sensor de vibração, também conhecido como acelerômetro. Este dispositivo é um transdutor que tem a capacidade de medir a aceleração da vibração em m/s^2 e a velocidade RMS da vibração em mm/s .

Considerando o comportamento observado em duas IMs durante o processo de infusão, caracterizado por um elevado nível de ruído e sinais evidentes de vibração em todo o conjunto, foram selecionados pontos estratégicos específicos: bomba de resina, bomba de peróxido e fluxímetro de peróxido, conforme indicado na Figura 4.17, para conduzir um estudo detalhado sobre o comportamento da vibração durante a fase de aceleração das bombas de resina e peróxido.

Figura 4.17 - Pontos de medição de vibração.



Fonte: Autoria própria.

Foram obtidos, através do supervisório da IM e do acelerômetro, os dados de frequência das bombas, fluxo de resina e peróxido e velocidade da vibração em RMS. As curvas de vibração correspondentes a cada ponto de medição serão apresentadas no próximo capítulo.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Pré-Diagnóstico

5.1.1 Confiabilidade

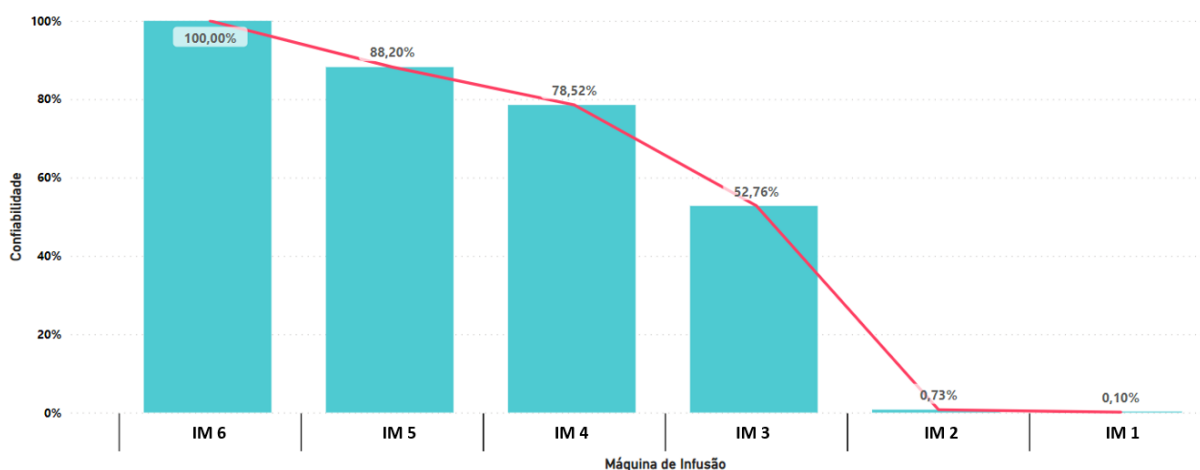
A partir dos dados do processo coletados por meio do SQL Server, foram calculados os seguintes indicadores de confiabilidade para as seis máquinas de infusão ao longo de um período de 30 dias: MTBF, taxa de falhas (λ) e confiabilidade $R(t)$ (Quadro 5.1 e Figura 5.1):

Quadro 5.1 - Confiabilidade do pré-diagnóstico.

IM	MTBF	λ	R(t)
1	0,2883	3,4687	0,097%
2	0,4068	2,4583	0,732%
3	3,1278	0,3197	52,760%
4	8,2747	0,1208	78,529%
5	15,9037	0,0629	88,183%
6	∞	0	100%

Fonte: Autoria própria.

Figura 5.1 - Confiabilidade do pré-diagnóstico.

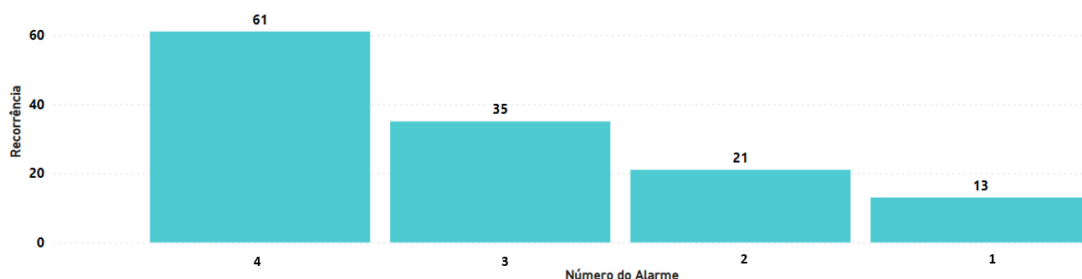


Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados obtidos, é evidente que existe uma disparidade na confiabilidade das máquinas de infusão, variando de níveis próximos a 100% a aproximadamente 0,10%. Para determinar as principais causas da baixa confiabilidade, uma análise dos dados provenientes do servidor, exportados para o PowerBI, revelou uma frequência considerável de ocorrência do alarme de baixo fluxo de peróxido (alarme 4) durante os processos de infusão. No mesmo período de 30

dias, esse alarme foi acionado em 61 vezes. Esse número superou as ocorrências dos alarmes de baixa taxa de mistura (alarme 2), alta taxa de mistura (alarme 1) e alta pressão no *manifold* (alarme 3), respectivamente, conforme exposto na Figura 5.2.

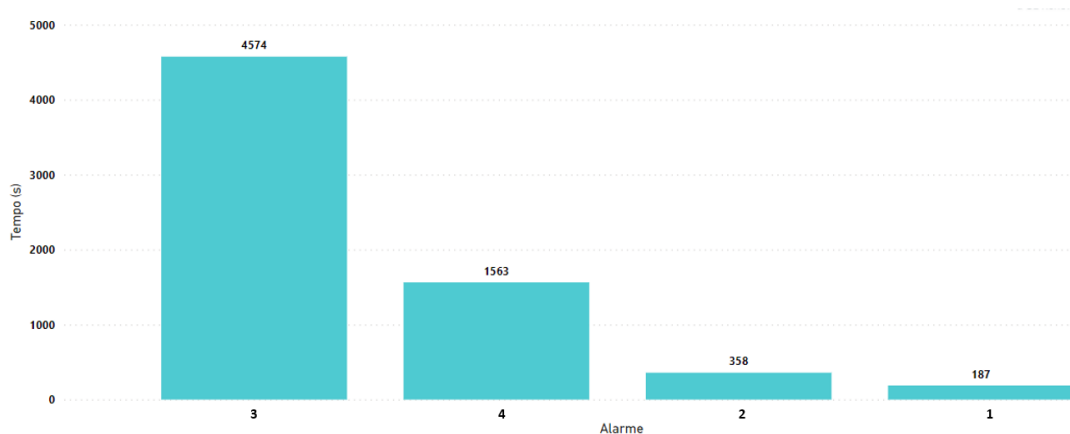
Figura 5.2 - Recorrência dos alarmes de infusão em um período de 30 dias (pré-diagnóstico).



Fonte: Autoria própria.

Além da frequência das ocorrências, para fins de estudo de confiabilidade, é fundamental examinar o impacto em relação à duração de cada alarme, uma vez que isso permite avaliar o tempo necessário para o reparo de cada um. De acordo com os dados apresentados na Figura 5.3, durante o mesmo período de 30 dias, o alarme de alta pressão no *manifold* (alarme 3) é o que requer um tempo maior para ser reparado. Isso ocorre devido à elevação da pressão resultante da catalisação da resina no interior do *manifold*, levando a uma pressão acima de 0,5 bar. Geralmente, essa catalisação decorre de resíduos remanescentes de resina e peróxido da infusão anterior que não foram removidos corretamente durante a lavagem do *manifold*. A medida corretiva para esse problema implica na descatalização do *manifold*, que pode ser feita por meio do uso de uma broca, ou em casos mais graves, substituindo o próprio *manifold*.

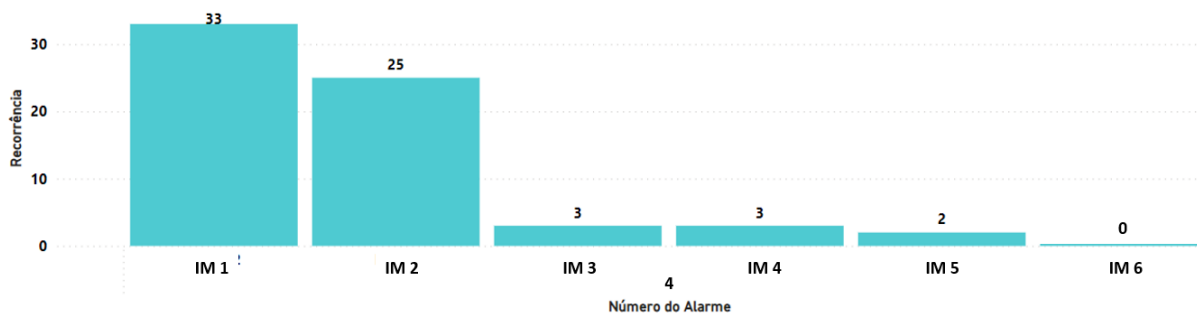
Figura 5.3 – Duração em segundos dos alarmes de infusão em um período de 30 dias (pré-diagnóstico).



Fonte: Autoria própria.

Considerando que a recorrência de falhas é o fator de maior impacto na confiabilidade, é relevante notar que o alarme 4 é o que mais se manifesta com frequência. Portanto, foi conduzida uma avaliação para compreender a incidência desse alarme nas seis IMs que fazem parte do estudo, ao longo do período de 30 dias (Figura 5.4):

Figura 5.4 - Recorrência do alarme 4 por IM (pré-diagnóstico).



Fonte: Autor.

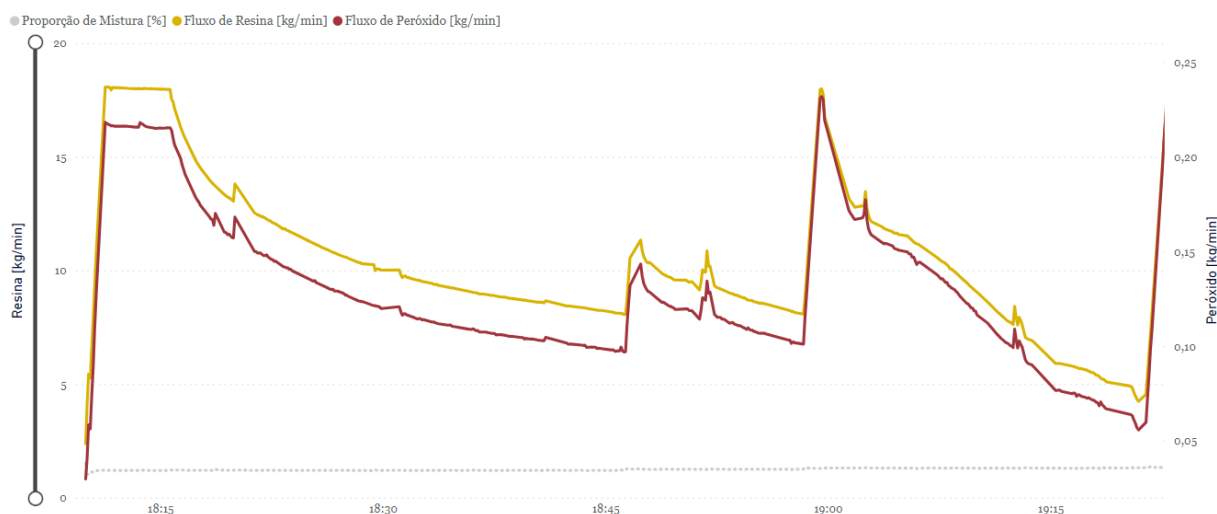
Observa-se, portanto, que a ocorrência do alarme de fluxo de peróxido muito baixo é significativamente mais frequente nas IMs 1 e 2, sendo o principal motivo da baixa confiabilidade associada a estas máquinas. Isso destaca a necessidade de conduzir uma investigação aprofundada para identificar as razões por trás dessa tendência.

5.1.2 Investigação do Alarme de Fluxo de Peróxido Muito Baixo

O alarme de baixo fluxo de peróxido está relacionado à proporção de mistura elevada. Em outras palavras, quando a leitura do medidor de fluxo de peróxido não coincide com a vazão estabelecida pelo *setpoint* de proporção de mistura por mais de 3 segundos, o alarme é ativado. É comum que esse alarme ocorra devido à presença de ar na linha de peróxido, o que pode afetar a leitura do fluxímetro.

De maneira geral, o controlador PID da bomba de peróxido não consegue acompanhar o controlador PID da bomba de resina conforme o *feedforward* durante esse período. Para ilustrar, a Figura 5.5 apresenta um exemplo do fluxo de peróxido seguindo o fluxo de resina durante uma infusão na IM 6, sem a ocorrência do alarme 4.

Figura 5.5 - Fluxo de resina e peróxido sem ocorrência do alarme 4 (IM 6).

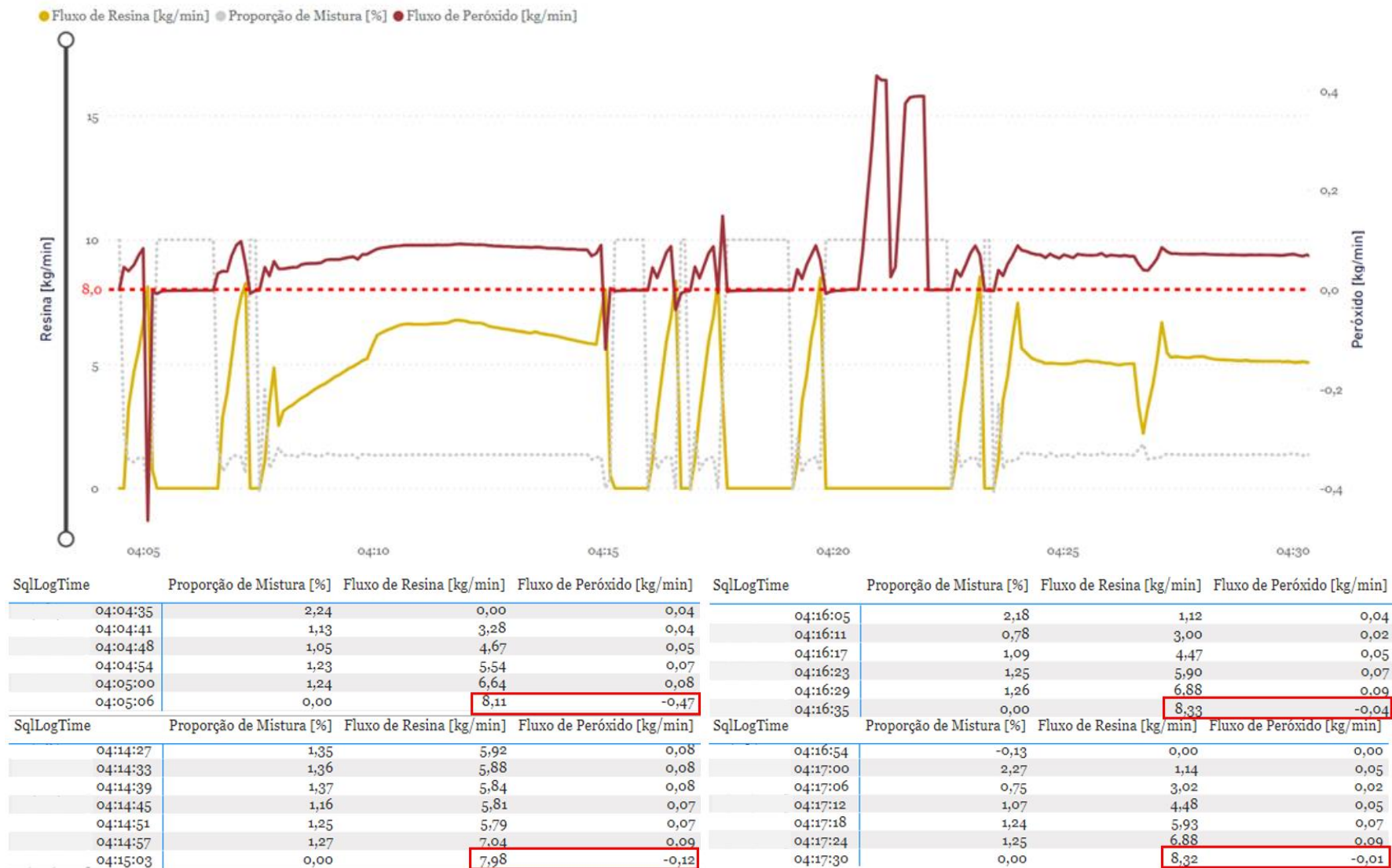


Fonte: Autoria própria.

De maneira análoga, para avaliar a incidência do alarme 4, obteve-se a curva do fluxo de resina e peróxido durante uma infusão nas IMs 1 e 2, respectivamente (Figuras 5.6 e 5.7).

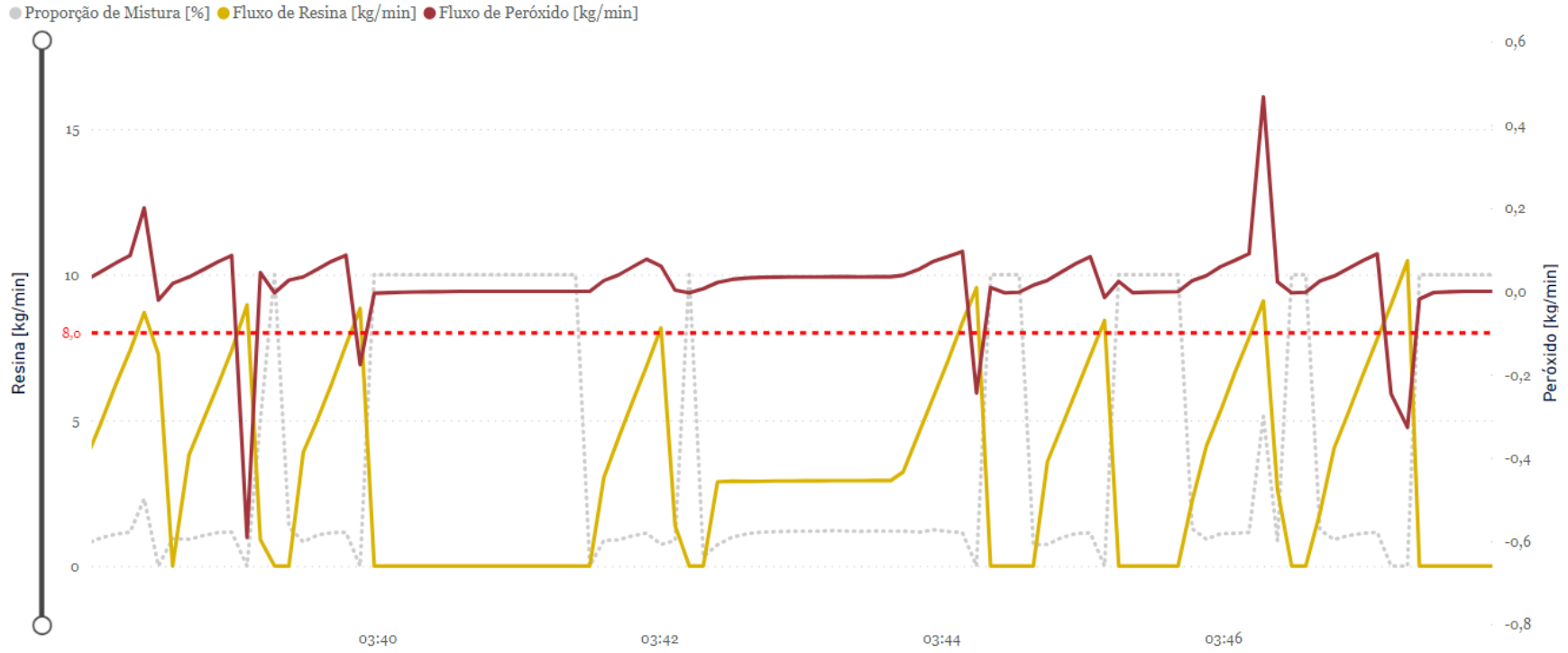
Os resultados indicam um comportamento anormal no fluxo de peróxido quando a bomba de resina atinge uma vazão de aproximadamente 8 kg/min. Esse padrão de comportamento se manifesta repetidamente ao longo do processo de infusão para essas duas IMs. Observa-se, igualmente, que a máquina exibe um nível considerável de ruído devido à vibração durante a rampa de subida da bomba de resina. Suspeita-se de que essa vibração possa coincidir com a frequência de ressonância do conjunto de elementos da máquina, incluindo o fluxímetro, levando a erros de leitura no fluxo de peróxido e, conseqüentemente, acionando o alarme 4.

Figura 5.6 - Fluxo de resina e peróxido com ocorrência do alarme 4 (IM 1).



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.7 - Fluxo de resina e peróxido com ocorrência do alarme 4 (IM 2).



SqlLogTime	Proporção de Mistura [%]	Fluxo de Resina [kg/min]	Fluxo de Peróxido [kg/min]	SqlLogTime	Proporção de Mistura [%]	Fluxo de Resina [kg/min]	Fluxo de Peróxido [kg/min]
03:39:22	1,35	0,00	0,03	03:44:33	10,00	0,00	0,00
03:39:28	0,83	3,91	0,03	03:44:39	0,74	0,00	0,01
03:39:34	1,06	5,04	0,05	03:44:45	0,74	3,59	0,03
03:39:40	1,15	6,27	0,07	03:44:51	0,98	4,80	0,05
03:39:46	1,15	7,59	0,09	03:44:57	1,12	6,00	0,07
03:39:52	0,00	8,84	-0,18	03:45:03	1,14	7,22	0,08
				03:45:09	0,00	8,43	-0,01
SqlLogTime	Proporção de Mistura [%]	Fluxo de Resina [kg/min]	Fluxo de Peróxido [kg/min]	SqlLogTime	Proporção de Mistura [%]	Fluxo de Resina [kg/min]	Fluxo de Peróxido [kg/min]
03:43:30	1,20	4,93	0,04	03:46:41	1,24	1,82	0,02
03:43:43	1,20	3,23	0,04	03:46:47	0,91	4,04	0,04
03:43:50	1,16	4,64	0,05	03:46:53	1,04	5,26	0,05
03:43:56	1,24	5,83	0,07	03:46:59	1,12	6,52	0,07
03:44:02	1,18	7,05	0,08	03:47:05	1,16	7,80	0,00
03:44:09	1,15	8,36	0,10	03:47:11	0,00	8,97	-0,25
03:44:15	0,00	9,55	-0,24				

Fonte: Autoria própria.

5.1.3 Medição de Vibração

5.1.3.1 Máquina de Infusão 1

Os dados referentes à frequência das bombas, fluxo de resina, fluxo de peróxido e à velocidade da vibração para cada ponto de medição da IM1 são apresentados nos Quadros 5.2, 5.3 e 5.4, respectivamente.

Quadro 5.2 - Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração na bomba de resina da IM1.

IM 1 – Medição de vibração na bomba de resina				
Fluxo de resina (Kg/min)	Frequência da bomba de resina (Hz)	Fluxo de peróxido (kg/min)	Frequência da bomba de peróxido (Hz)	Velocidade de vibração (mm/s)
3,02	8,7	0,045	12,85	0,12
4,48	10,8	0,065	16,96	0,33
4,96	12	0,073	19,4	0,37
5,92	13,6	0,091	22,7	0,36
6,41	14,6	0,091	24,74	0,27
6,89	15,79	0,107	27,06	0,57
7,38	16,3	0,115	28,99	1,04
7,88	17,69	0,122	30,5	1,46
8,37	18,3	0,109	32,56	1,42
8,89	19,3	0,136	35,2	1,49
9,4	19,9	0,151	36,32	1,46
9,91	20,9	0,162	38,02	1,46
10,41	21,7	0,169	31,19	1,26
10,9	22,5	0,176	40,41	1,22
11,42	23,5	0,192	41,8	1,19
11,9	24,5	0,191	43,16	1,1
12,43	25,3	0,193	44,58	0,7
12,95	26,2	0,201	46,14	0,69
13,44	27,4	0,208	47,79	0,61
14,49	29	0,223	51,96	0,34
15,006	29,8	0,232	53,45	0,28
15,44	31,19	0,239	55,19	0,29
16,01	32	0,247	57,9	0,31
16,53	32,6	0,258	59,06	0,43
17,03	33	0,266	59,78	0,59
19,38	33	0,27	59,78	0,55

Fonte: Autoria própria.

Quadro 5.3 - Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração na bomba de peróxido da IM1.

IM 1 – Medição de vibração na bomba de peróxido				
Fluxo de resina (Kg/min)	Frequência da bomba de resina (Hz)	Fluxo de peróxido (kg/min)	Frequência da bomba de peróxido (Hz)	Velocidade de vibração (mm/s)
3,45	9,2	0,052	14,58	0,18
3,95	10,2	0,059	16,59	0,17
4,96	12,2	0,075	20,8	0,38
5,46	13	0,084	21,64	0,41
5,97	13,8	0,091	23,95	0,4
6,48	14,6	0,102	25,51	0,39
6,99	15,69	0,11	27,42	0,4
7,48	16,7	0,118	29,33	0,6
8	17,5	0,125	30,89	0,58
8,51	18,3	0,089	33,46	0,94
9,04	19,5	0,146	37,91	1,72
9,57	20,3	0,164	38,9	1,57
10,07	21,1	0,17	39,69	1,03
10,6	22,3	0,174	41,1	0,8
11,13	23,6	0,181	42,84	0,71
11,67	24,2	0,188	43,82	0,73
12,25	25,4	0,192	45,89	0,59
12,77	26,2	0,2	47,39	0,42
13,32	27	0,207	49,07	0,33
13,86	27,8	0,216	50,68	0,3
14,42	28,8	0,224	52,63	0,4
14,97	29,8	0,234	54,56	0,38
15,57	31	0,241	56,18	0,22
16,06	31,59	0,248	58,1	0,16
16,61	32,6	0,258	59,99	0,37
17,16	33	0,265	60,94	0,37
17,4	33	0,247	61,36	0,29

Fonte: Autor.

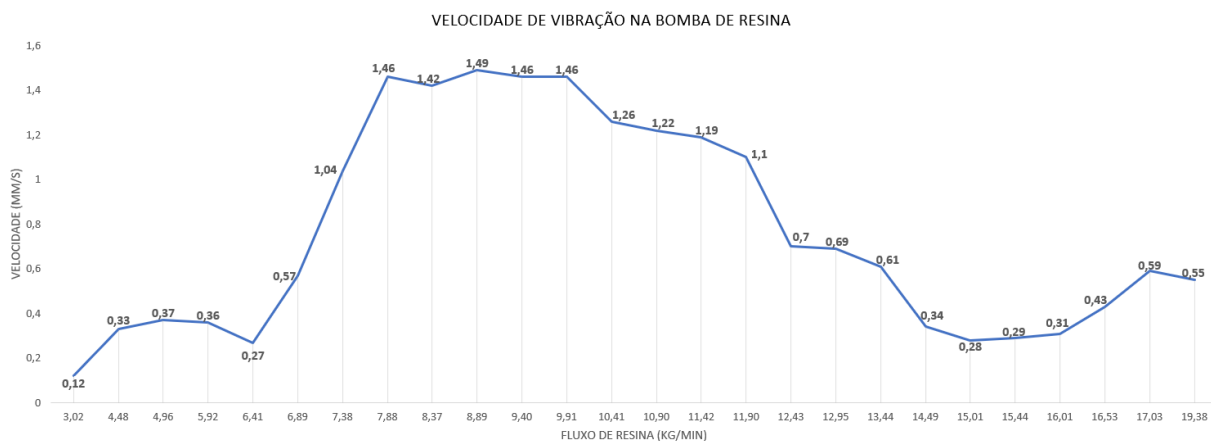
Quadro 5.4 - Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração no fluxímetro de peróxido da IM1.

IM 1 – Medição de vibração no fluxímetro de peróxido				
Fluxo de resina (Kg/min)	Frequência da bomba de resina (Hz)	Fluxo de peróxido (kg/min)	Frequência da bomba de peróxido (Hz)	Velocidade de vibração (mm/s)
1,54	6,3	0,022	9,9	0,8
2,97	6,7	0,017	10,5	3,49
3,91	7,2	0,016	37,6	3,43
4,24	7,6	0,075	39	3,52
4,50	7,9	0,111	38,9	3,49
5,27	9,1	0,132	37,9	5,07
5,89	10,2	0,131	37,6	3,74
6,12	12,7	0,132	38,4	3,66
7,39	13,2	0,142	40,9	5,72
7,71	14,7	0,146	41,8	6,11
8,02	15,7	0,148	41,2	10,8
8,37	16,2	0,148	41,6	11,5
8,97	17,9	0,149	41,9	11,5
9,21	18,1	0,151	42,8	11,5
10,08	18,8	0,153	43,5	8,25
10,07	19,3	0,159	45,1	5,34
10,63	20,1	0,168	47	7,45
11,19	20,8	0,175	48,4	7,59
11,91	21,5	0,186	51,1	5,97
12,32	22,2	0,192	52,5	5,35
12,71	23,1	0,2	53,9	4,07
13,17	23,8	0,206	55,4	3,96
14,47	24,3	0,225	59,6	3,95
15,18	25,3	0,236	62	2,9
16,66	27,8	0,259	67	2,88

Fonte: Autor.

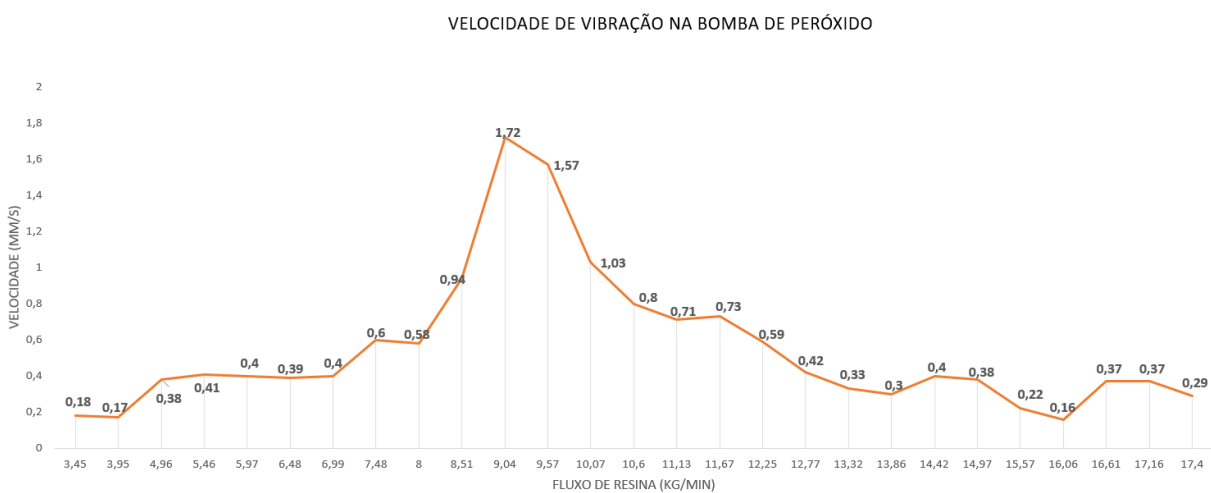
A fim de correlacionar algumas variáveis por meio da análise gráfica, aqueles que apresentam a relação entre o fluxo de resina e as vibrações na bomba de resina, bomba de peróxido e fluxímetro de peróxido durante a rampa de subida das bombas da IM1 são mostrados nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10, respectivamente:

Figura 5.8 – Velocidade de vibração na bomba de resina (IM1).



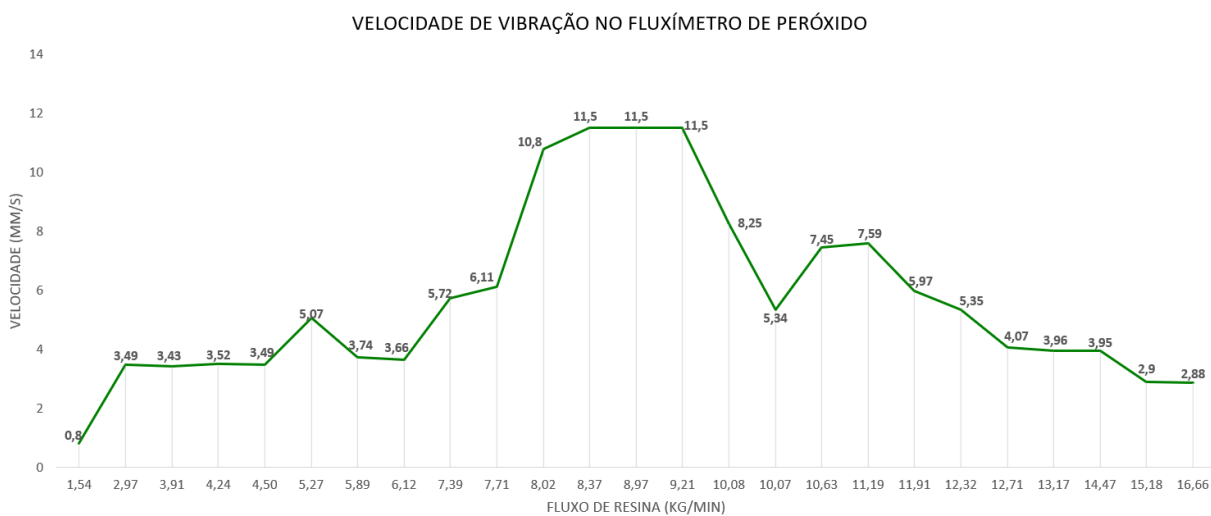
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.9 - Velocidade de vibração na bomba de peróxido (IM1).



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.10 - Velocidade de vibração no fluxímetro de peróxido (IM1).



Fonte: Autoria própria.

Os resultados da medição revelam um pico de vibração em todo o sistema quando a bomba de resina atinge aproximadamente 8 kg/min de vazão. Nesse ponto, a bomba de resina apresenta uma frequência aproximada de 17Hz, enquanto a bomba de peróxido exibe uma frequência em torno de 41Hz. A máxima velocidade de vibração foi registrada como 1,49 mm/s para a bomba de resina, 1,72 mm/s para a bomba de peróxido e notavelmente elevada em 11,5 mm/s para o fluxímetro de peróxido. Esses dados indicam que o fluxímetro de peróxido é o componente mais impactado pela frequência de vibração. Como trata-se de um sensor, durante esse pico de vibração, ele é propenso a erros de leitura, desencadeando o alarme de fluxo de peróxido muito baixo (alarme 4) e diminuindo consideravelmente a confiabilidade da máquina de infusão.

5.1.3.2 *Máquina de Infusão 2*

Ao conduzir o teste de vibração na bomba de resina, bomba de peróxido e fluxímetro de peróxido, desta vez para a IM2, também foram coletados os dados relacionados à frequência das bombas, fluxo de resina, fluxo de peróxido e velocidade de vibração. Esses resultados estão apresentados nos Quadros 5.5, 5.6 e 5.7, respectivamente.

Quadro 5.5 – Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração na bomba de resina da IM2.

IM 2 – Medição de vibração na bomba de resina				
Fluxo de resina (Kg/min)	Frequência da bomba de resina (Hz)	Fluxo de peróxido (kg/min)	Frequência da bomba de peróxido (Hz)	Velocidade de vibração (mm/s)
3,728	6	0,089	26,5	0,27
4,853	6,4	0,08	27,8	0,28
5,17	9	0,087	29,5	0,27
5,58	9,7	0,095	31,1	0,26
6,7	11,4	0,117	35,8	0,21
7,19	12,3	0,126	38	0,6
7,31	12,7	0,129	39	0,67
7,57	13	0,134	39,7	0,68
7,87	13,5	0,14	40,6	0,68
8,33	14,3	0,144	40,8	0,69
8,644	14,6	0,145	41,2	0,71
9,01	15,3	0,147	41,9	0,93
9,22	15,8	0,149	42,4	0,75
9,27	16,4	0,153	43,4	0,77
9,74	16,7	0,155	43,8	0,75
10,08	17,2	0,159	45,1	0,72
11,38	19,4	0,179	49,4	0,7
12,07	20,4	0,189	51,4	0,5
14,23	24	0,221	58,9	0,52
14,71	24,7	0,229	60,3	0,31
15,35	25,7	0,238	62,4	0,3
16,07	26,9	0,249	65,1	0,33
16,4	27,5	0,256	66,1	0,29
16,82	28,2	0,263	67,6	0,25
18,04	29,5	0,273	68,1	0,17

Fonte: Autoria própria.

Quadro 5.6 - Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração na bomba de peróxido da IM2.

IM 2 – Medição de vibração na bomba de peróxido				
Fluxo de resina (Kg/min)	Frequência da bomba de resina (Hz)	Fluxo de peróxido (kg/min)	Frequência da bomba de peróxido (Hz)	Velocidade de vibração (mm/s)
4,91	8,7	0,132	38,2	0,36
5,45	9,3	0,132	37,7	0,34
5,88	10,1	0,131	37,6	0,39
6,19	10,6	0,132	38,1	0,55
6,75	11,5	0,135	39,2	0,38
7,06	12	0,138	39,8	0,37
7,57	12,9	0,143	41,3	0,33
8,1	13,8	0,149	41,3	0,9
8,75	14,8	0,148	41,6	0,9
9,04	15,4	0,15	42,4	0,61
9,56	16,4	0,156	44	0,64
9,92	17	0,159	44,9	0,54
10,34	17,7	0,162	46,1	0,53
10,54	18	0,168	46,5	0,32
11,4	19,3	0,178	49,2	0,3
11,99	20,1	0,186	51,1	0,23
12,24	20,7	0,191	52,1	0,23
13,07	21,9	0,202	54,6	0,26
13,8	23,1	0,208	57,3	0,18
14,34	24	0,223	59,1	0,17
14,8	24,9	0,233	61	0,2
16,17	25,4	0,238	62	0,15
15,78	26,5	0,248	64,3	0,11
16,55	27,6	0,258	66,6	0,11
17,96	29,5	0,279	69,8	0,11

Fonte: Autoria própria.

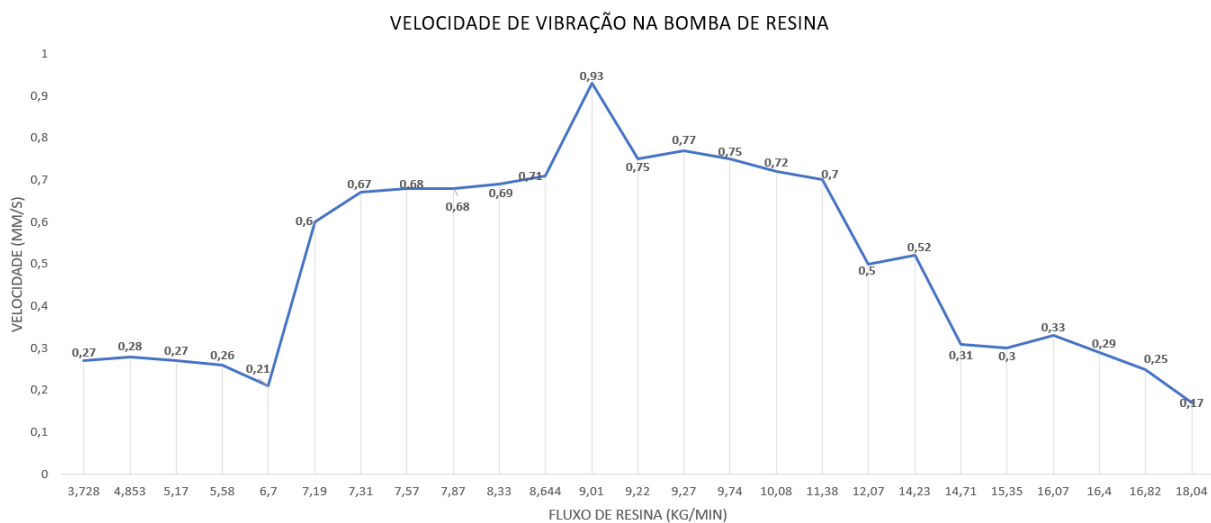
Quadro 5.7 – Dados de fluxo de resina, frequência da bomba de resina, fluxo de peróxido, frequência da bomba de peróxido e velocidade de vibração no fluxímetro de peróxido da IM2.

IM 2 – Medição de vibração no fluxímetro de peróxido				
Fluxo de resina (Kg/min)	Frequência da bomba de resina (Hz)	Fluxo de peróxido (kg/min)	Frequência da bomba de peróxido (Hz)	Velocidade de vibração (mm/s)
2,45	6	0,037	8,7	0,85
3,79	9,3	0,051	14,94	1,47
4,29	10,9	0,064	18,32	1,72
5,28	12,7	0,08	21,8	1
5,77	13,3	0,091	22,96	1
6,28	14,5	0,01	25,24	1,7
6,8	15,2	0,108	26,38	4,63
7,31	16,4	0,117	28,64	3,7
8,32	18,2	0,114	32,92	9,43
8,86	19	0,137	35,03	9,27
9,04	20	0,151	36,88	5,82
9,91	20,8	0,162	38,13	6,73
10,45	21,8	0,17	39,6	4,44
10,9	23	0,176	41,48	4,32
11,49	23,6	0,207	41,97	4,31
12,04	24,5	0,19	42,6	4,25
12,56	25,7	0,192	44,91	4,22
13,088	26,5	0,2	46,8	3,96
13,63	27,7	0,209	49,3	3,57
14,16	28,5	0,218	50,96	3,4
14,7	29,5	0,227	52,9	3,4
15,24	30,5	0,236	55	2,84
15,76	31,59	0,244	56,089	2,62
16,3	32,4	0,251	58,59	1,77
16,81	33	0,261	59,96	1,1
17,4	33	0,27	59,46	1,11

Fonte: Autoria própria.

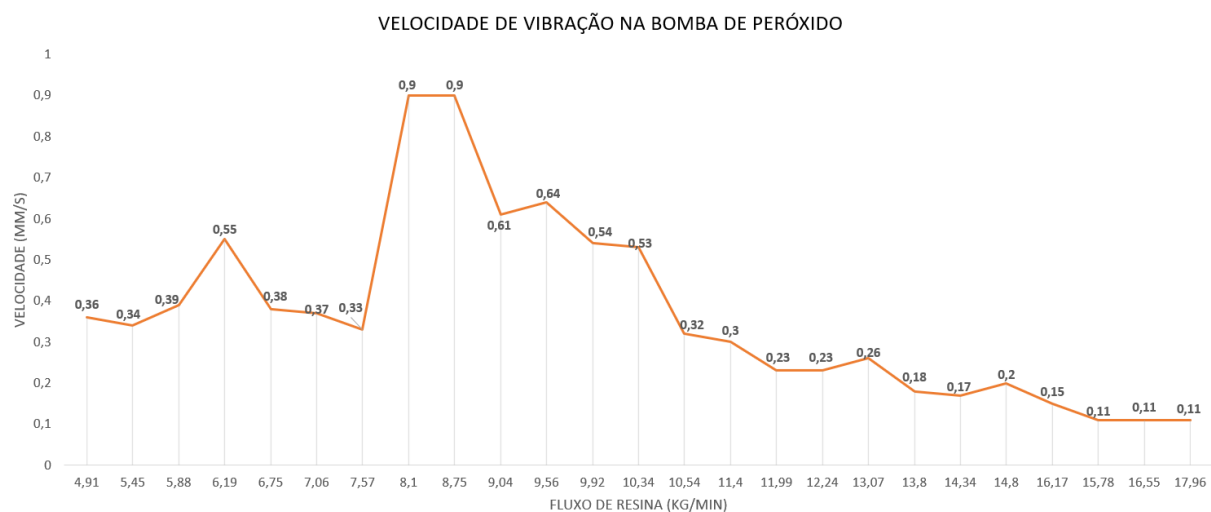
Assim como na IM1, nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 são ilustradas as correlações entre o fluxo de resina e as vibrações nas bombas de resina e peróxido, bem como no fluxímetro de peróxido, durante a rampa de aceleração das bombas da IM2.

Figura 5.11 - Velocidade de vibração na bomba de resina (IM2).



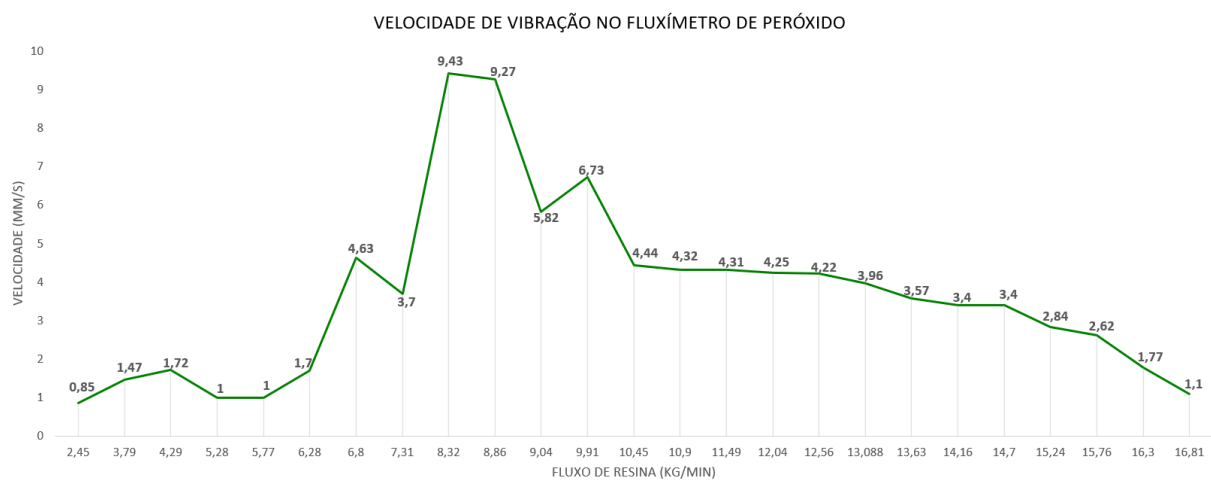
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.12 - Velocidade de vibração na bomba de peróxido (IM2).



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.13 - Velocidade de vibração no fluxímetro de peróxido (IM2).



Fonte: Autoria própria.

Conforme esperado, os resultados obtidos da medição de vibração para a IM2 corroboram com os resultados obtidos referentes a IM1. Os picos de vibração persistem nas proximidades de 8 kg/min de vazão de resina, também associados a uma frequência aproximada de 17Hz para a bomba de resina e cerca de 41Hz para a bomba de peróxido. A bomba de resina registrou um pico de 0,93 mm/s na velocidade de vibração, enquanto a bomba e o fluxímetro de peróxido apresentaram picos de 0,9 mm/s e 9,43 mm/s, respectivamente. Os valores da velocidade de vibração na IM2 são inferiores aos registrados na IM1, porém ainda são significativos o bastante para acionar o alarme de fluxo de peróxido muito baixo com frequência.

5.2 Pós-Diagnóstico

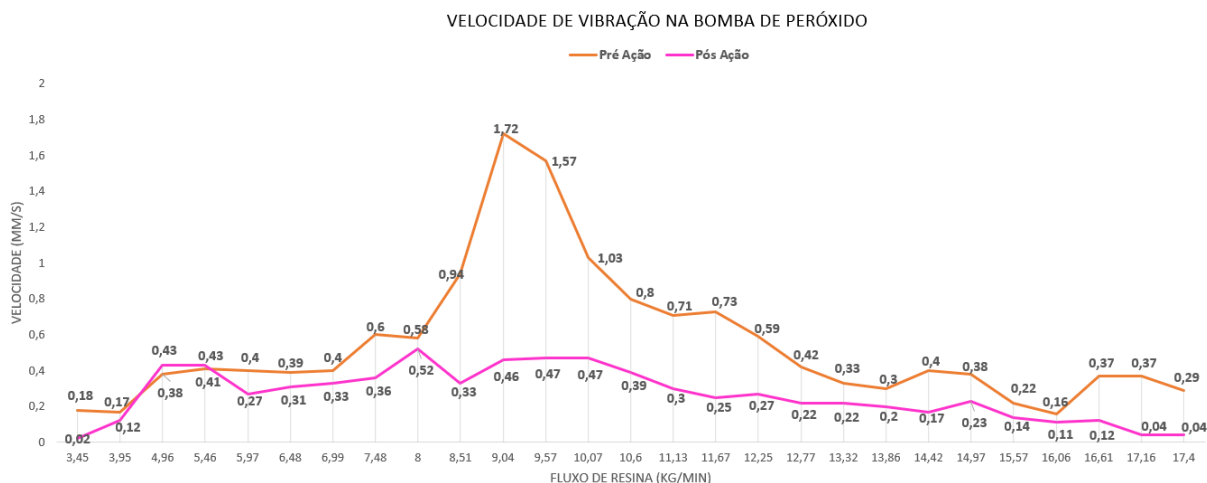
Considerando que o ponto focal das vibrações reside no fluxímetro de peróxido, que está conectado à bomba de peróxido por meio de uma mangueira e, conseqüentemente, também é afetado pela vibração proveniente dela, uma medida corretiva foi implementada. Foi inserido um material emborrachado de 1,5 cm, que já se encontrava disponível na planta, sob a bomba de peróxido para avaliar a resposta vibracional subsequente das duas máquinas de infusão. Essa intervenção visa, primariamente, modificar as propriedades de amortecimento do sistema. O amortecimento está associado à capacidade de dissipar a energia vibracional e diminuir a amplitude das oscilações.

5.2.1 Medição de Vibração

5.2.1.1 Máquina de Infusão 1

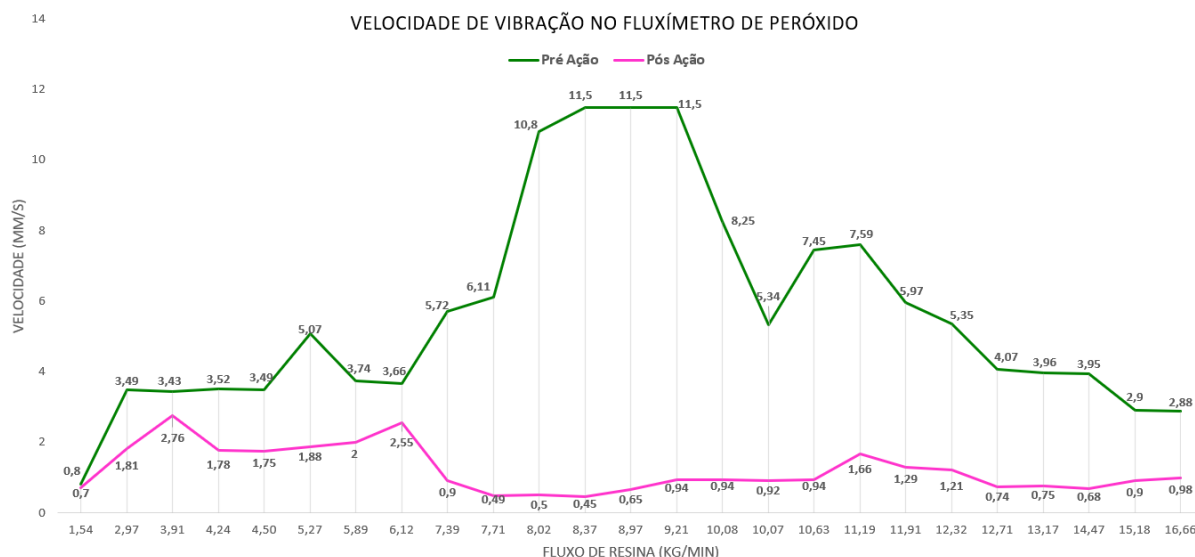
A velocidade de vibração na bomba e fluxímetro de peróxido antes e após a inserção do material emborrachado são apresentadas nas Figuras 5.17 e 5.18, respectivamente:

Figura 5.14 - Aceleração de vibração na bomba de peróxido antes e após a ação corretiva (IM1).



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.15 - Aceleração de vibração no fluxímetro de peróxido antes e após a ação corretiva (IM1).



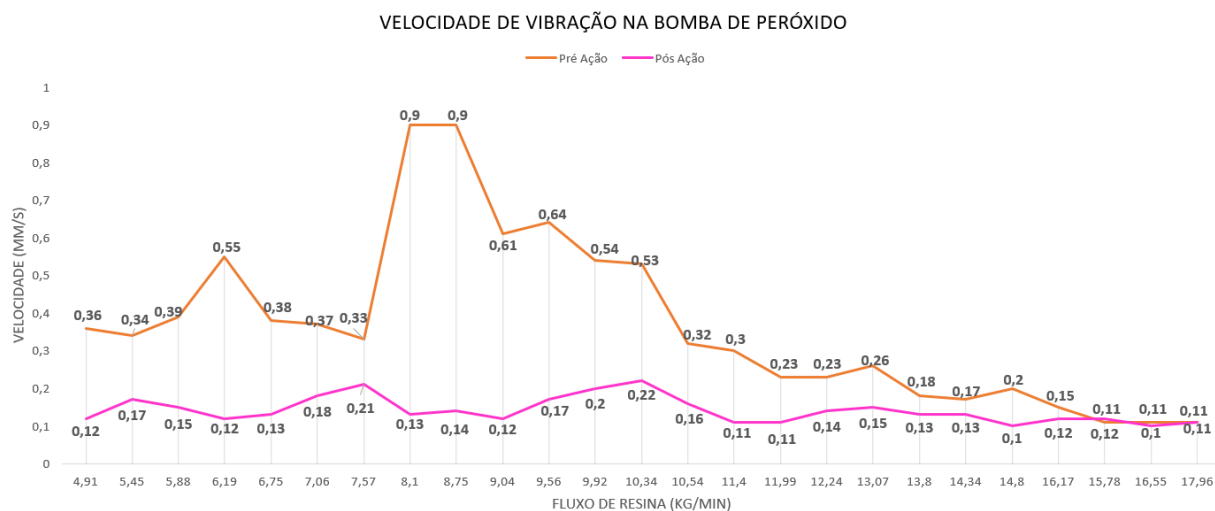
Fonte: Autoria própria.

Segundo os resultados obtidos, antes da intervenção corretiva, a média da velocidade de vibração na bomba de peróxido e no fluxímetro de peróxido, quando a bomba de resina estava operando entre 7 e 10 kg/min, era de 1,03 mm/s e 8,68 mm/s, respectivamente. Após a aplicação do material emborrachado sob a bomba de peróxido, a média da velocidade de vibração na bomba e no fluxímetro de peróxido, para o mesmo intervalo de vazão da bomba de resina, diminuiu para 0,42 mm/s e 0,74 mm/s. Isso evidencia que a medida corretiva teve um impacto significativo na redução da vibração da IM1.

5.2.1.2 Máquina de Infusão 2

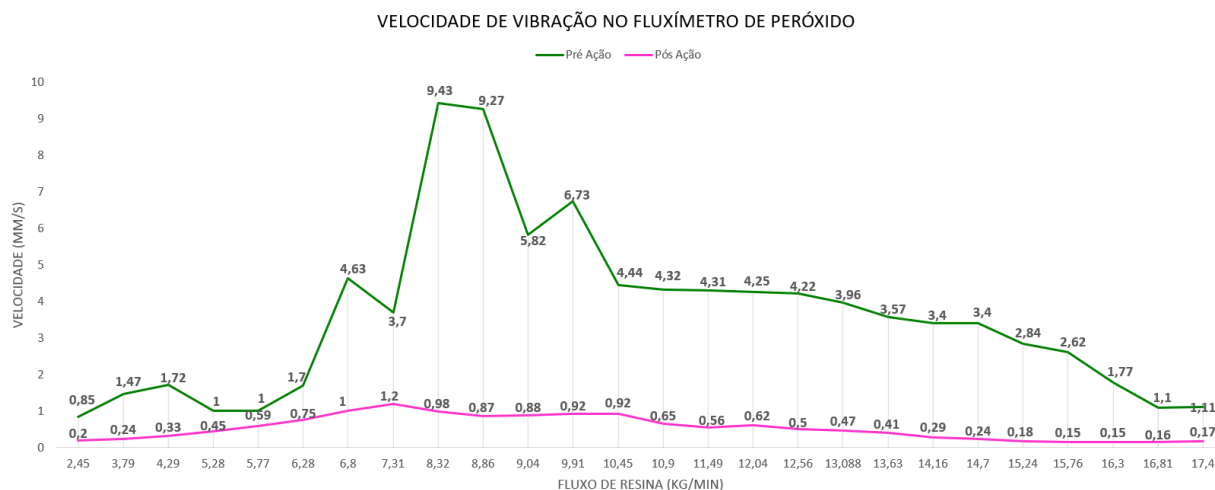
Conduzindo a mesma análise comparativa pré e pós-intervenção corretiva para a IM2, as Figuras 5.19 e 5.20 exibem as velocidades de vibração na bomba e no fluxímetro de peróxido antes e depois da incorporação do material emborrachado.

Figura 5.16 - Aceleração de vibração na bomba de peróxido antes e após a ação corretiva (IM2).



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.17 - Aceleração de vibração no fluxímetro de peróxido antes e após a ação corretiva (IM2).



Fonte: Autoria própria.

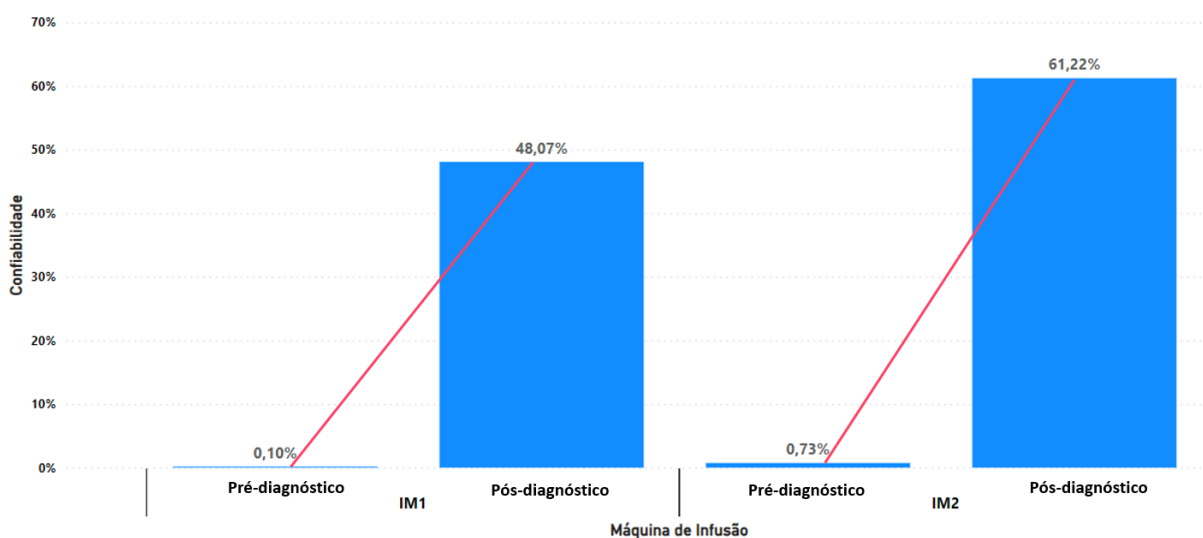
Os resultados indicam que, no intervalo de 7 a 10 kg/min de vazão da bomba de resina, a média da velocidade de vibração antes da intervenção corretiva era de 0,57 mm/s para a bomba e 6,24 mm/s para o fluxímetro de peróxido. Após a aplicação do material emborrachado sob a bomba de peróxido, as médias de vibração diminuíram para 0,17 mm/s e 0,91 mm/s, respectivamente. Esses resultados

destacam a eficácia dessa medida para reduzir significativamente o pico de vibração nas máquinas de infusão.

5.2.2 Confiabilidade

Após observar resultados satisfatórios na redução da vibração das máquinas de infusão, procedeu-se à verificação do impacto efetivo dessa ação na confiabilidade do processo de infusão, visando também reduzir a incidência do alarme de fluxo de peróxido muito baixo. Para avaliar esse efeito, as IMs 1 e 2 foram monitoradas ao longo de um período de 30 dias, e a análise de confiabilidade foi repetida. Os resultados pré e pós ação corretiva estão apresentados na Figura 5.21:

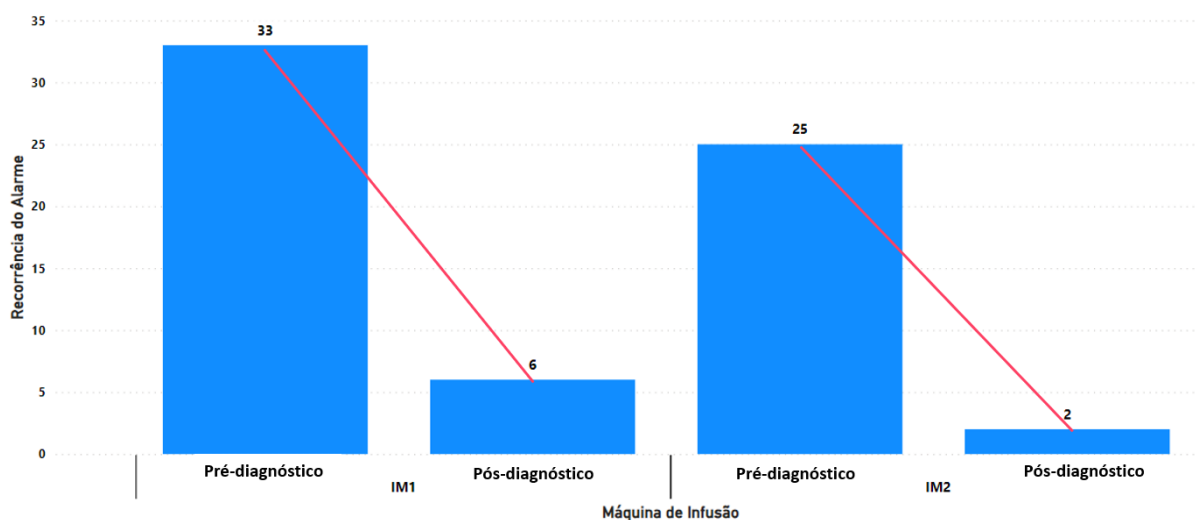
Figura 5.18 - Confiabilidade da IM1 e IM2 no pré e pós-diagnóstico.



Fonte: Autoria própria.

É evidente que a confiabilidade da IM1 e IM2 experimentou um aumento notável com a aplicação de um material emborrachado sob a bomba de peróxido. A confiabilidade da IM1 aumentou em 47,97%, enquanto a da IM2 teve um incremento de 60,49%. Esse aprimoramento é atribuído à significativa redução nos alarmes de fluxo de peróxido muito baixo (conforme mostrado na Figura 5.22), que anteriormente representava o principal fator prejudicial à confiabilidade dessas máquinas de infusão.

Figura 5.19 - Recorrência do alarme 4 na IM1 e IM2 no pré e pós-diagnóstico.



Fonte: Autoria própria.

O alarme de fluxo de peróxido muito baixo teve uma diminuição de 81,8% para a IM1 e 92% para a IM2. Esses números reforçam a constatação de que a ativação do alarme estava relacionada à intensa vibração da máquina, e a medida corretiva se revelou eficaz na prevenção dele.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto das máquinas de infusão, a confiabilidade é um fator crucial para garantir o sucesso dos processos de fabricação sem atrasos e prejuízos financeiros. No entanto, os resultados obtidos revelaram uma disparidade significativa nos níveis de confiabilidade entre as seis máquinas de infusão estudadas, variando de aproximadamente 100% a 0,10%. A análise detalhada dos dados revelou que a recorrência do alarme de baixo fluxo de peróxido (alarme 4) era a principal causa dessa disparidade, superando em frequência outros alarmes relacionados à mistura e pressão.

A investigação revelou que o alarme 4 estava diretamente relacionado à vibração intensa durante a rampa de aceleração das bombas de resina e peróxido, quando a bomba de resina atinge aproximadamente 8 kg/min de vazão. Os testes de vibração evidenciaram picos significativos nessa faixa de vazão, correlacionados a frequências específicas para as bombas de resina e peróxido. Esse cenário resultava em erros de leitura no fluxímetro de peróxido, desencadeando o alarme e comprometendo a confiabilidade do processo de infusão.

Para mitigar esse problema, foi implementada uma medida corretiva consistente na inserção de material emborrachado de 1,5 cm sob as bombas de peróxido. Essa intervenção visava aumentar o amortecimento da bomba, diminuindo a energia vibracional do sistema e, conseqüentemente, a recorrência do alarme 4. Os resultados pós-diagnóstico demonstraram uma redução substancial na vibração, refletindo-se em uma melhoria notável na confiabilidade das máquinas de infusão. Observou-se uma redução de aproximadamente 70% no pico de vibração da bomba de peróxido e 76% no fluxímetro de peróxido na IM1. Na IM2, observou-se uma diminuição ainda mais expressiva, com os picos diminuindo em 75,5% na bomba de peróxido e 87% no fluxímetro de peróxido. Os resultados apontam que a solução proporcionou aumentos de confiabilidade de 47,97% para a IM1 e 60,49% para a IM2, respectivamente, corroborados pela drástica redução de 81,8% (IM1) e 92% (IM2) na ocorrência do alarme de fluxo de peróxido muito baixo.

Os resultados obtidos tiveram um impacto direto na diminuição dos defeitos na infusão, resultando em um aprimoramento na qualidade. Após o projeto de confiabilidade, a incidência de *scraps* das pás diminuiu cerca de 95%, estando

relacionado, também, a melhoria do processo como um todo. Além disso, contribuíram para a diminuição do tempo de ciclo na produção de pás eólicas, ao prevenir a necessidade de reparos adicionais no processo pós-moldagem. Essas melhorias não apenas fortaleceram a eficiência operacional, mas também maximizaram a produção de bens e serviços, com o menor consumo de energia possível, colaborando para o aumento geral da eficiência energética na planta. Em termos de tempo de mão de obra técnica em manutenções corretivas, antes do projeto, a média para ambas as máquinas de infusão, em um período de 30 dias, era de 10 horas. Posteriormente ao projeto, a média obtida foi reduzida para 3,5 horas, indicando uma significativa melhoria na eficiência e na gestão de manutenções.

Como perspectiva para trabalhos futuros, sugere-se a análise de modos de falhas para os demais alarmes relacionados à alta taxa de mistura e baixa taxa de mistura, bem como à alta pressão no *manifold*, que impactam diretamente na confiabilidade das máquinas de infusão. Além disso, propõe-se um estudo detalhado visando eliminar a energia vibracional em todo o sistema, incluindo a bomba de resina. Avaliar a viabilidade e a necessidade de implementar rotinas de manutenção preditivas para análise de vibração nas bombas, aliadas a diagnósticos abrangentes para correções, também representará um passo essencial para prevenir potenciais problemas e otimizar o desempenho da máquina.

7 REFERÊNCIAS

ALENCAR, G. T. L. **Um estudo de tempos para elaboração do cronograma de produção numa fábrica de pás eólicas.** Universidade Federal do Ceará, 2014.

ALVES, A. M. **Desenvolvimento de um aplicativo computacional para dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tipo tubular.** 105p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

AZEVEDO, J. P. M.; NASCIMENTO, R. S.; SCHRAM, I. B. **Energia eólica e os impactos ambientais: um estudo de revisão.** Faculdade Maringá – Uningá, 2016.

BELINELLI, M. M. **Desenvolvimento de método para seleção de política de lubrificação de máquinas centrada em confiabilidade.** São Paulo, 2015.

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. **Wind Energy Handbook.** Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais.** Editora Blucher, 2010.

CBEE. **Energia Eólica: Tecnologias de Aproveitamento – Turbinas Eólicas.** 2000. Disponível em: www.eolica.com.br Acesso em: 07 de julho de 2023.

CRESESB. **Tipos de Aerogeradores para geração de energia elétrica.** 2008. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=231 Acesso em: 10 de julho de 2023.

CORTIR; FAHR, A.; KANDEIL, A. Y. **The Blade Handbook™: A shared lingo for the future of wind.** Ultrasonic C-Scan Inspection of Composite Materials. Engineering Journal of Qatar University, Edition 2019.

COSTA, H. C. C.; **Dimensionamento e fabricação de pás de torres eólicas.** Joaboação dos Guarapes, 2022.

Mastbergen, D. B. **Simulation and Testing of Resin Infusion.** Montana State University, 2007.

DIAS J. A. M.; PEREIRA, Z. L.; **Fiabilidade e gestão da manutenção de sistemas reparáveis**. Lisboa, 2005.

DUTRA, R. **Energia eólica: princípios e tecnologia**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2008.

EDWARDS, D.; HOLT, J. G. D.; HARRIS, F. C. **Predictive maintenance techniques and their relevance to construction plant**. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 1998.

EISINGER, S.; RAKOWSKY, U. K. **Modeling of uncertainties in reliability centered maintenance: a probabilistic approach**. Reliability Engineering & System Safety, 2000.

ELSAYED, E. **System Reliability Engineering**. Readings, Massachusetts: Addison Wesley Longman, 1996.

ENBLIN, C.; HAHN, B. **Wind Energy Report Germany**, 2003.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Relatório Síntese 2023. Ano base 2022**. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

FOGLIATTO, F.; RIBEIRO, J. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2009.

GASCH, R.; TWELE, J. **Wind Power Plants: Fundamentals, Desing, Construction and Operacion**. Solarpraxis AG, 2002.

GNOATTO, H. **Análise de viabilidade técnica e econômica para implantação de aerogerador em propriedades rurais de Cascavel**, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

GIRDHAR, P.; SCHEFFER, C. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Burlington, Reino Unido: Newnes, 2004.

GUIMARÃES, A. O. **Algoritmo genético aplicado no controle de posição do rotor de um motor de corrente contínua com rejeição a distúrbios por ação feedforward**. Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró - RN, 2013.

ELSAYED, E. **System Reliability Engineering**. Readings, Massachusetts, 1996.

HANSEN, M. **Basic Rotor Aerodynamics applied to Wind Turbines**. Department of Energy Engineering Fluid Mechanics, Technical University of Denmark, January 1998.

JACOBI, P. **Sustentabilidade ambiental, consumo e cidadania**. São Paulo: Cortez Editora, 2006.

JASEN, W. A. M.; SMULDERS, P.T. **Rotor Design for Horizontal Axis windmills**. S.W.D, Netherlands, 1977.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KRAUSE, P. C. **Analysis of Electric Machinery**. McGraw-Hill, 1986.

KROHN, S. **Wind Turbines: How many blades**. Danish Wind Industry Association, 2003.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LEVINE, W. S. **The Control Handbook**. Boca Raton FL, 1996.

LEWIS, E. E. **Introduction to reliability engineering**. John Wiley & Sons, 1996.

LOPES, I. A. F. **Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos – Produção de tampa de bagageira para autocarro**. Universidade do Porto, Porto, 2009.

MAYA, P. A.; LEONARDI F. **Controle Essencial**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2011.

MARQUES, J. **Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. Universidade Federal de Santa Maria (RS), 2004.

MERCURI, J. R.; MARTINS O. F.; TRAUTMANN P. V. **Desenvolvimento de um sistema supervisor para análise de motores elétricos através da vibração mecânica**. Curitiba, 2011.

MODARRES, M. **What every engineer should know about reliability and risk analysis**. New York, 1992.

MOUBRAY, J. **Reliability-centred Maintenance (RCM)**. Aladon, Grã Bretanha, 2000.

MURPHY, B.; VANCE, J. & ZEIDAN, F. **Machinery Vibration and Rotordynamics**. Hoboken, 2010.

MURRAY, R. M.; Astrom K. J; Boyd S. P.; Brockett R. W; Stein G. **Future directions in control in an information-rich world**. IEEE Control Systems Magazine, 2003.

MUSHADAD, M. E. H. B. **Investigation into Resin Infusion Strategies in the Fabrication of GRE Composite Wind Turbine Blade**. Universiti Teknologi Petronas Tronoh, Perak, 2012.

NACHLAS, J. A. **Reliability Engineering: probabilistic models and maintenance models**. New York: CRC Press, 2017.

OGATA, K. **Discrete-Time Control System**. Prentice Hall, 1995, 2^o edition.

PARK, J. **The Wind Power Book**. Cheshire Books, Palo Alto, California, 1981.

PDE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2022.

PEREIRA, J. G. C. **Monitorização do modelo físico de uma pá de uma turbina eólica**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.

RAGONDET, A. **Experimental characterization of the vacuum infusion process**. University of Nottingham, Nottingham, 2005.

RIJSWIJK, K. V. **Vacuum infusion technology for anionic polyamide-6 composites**. Technische Universiteit Delf, 2007.

SANTOS, J. P. C. **Estudo da infiltração de ar no processo de infusão de compósitos estruturais de pás eólicas**. Universidade Federal Do Ceará, 2018.

SELLITTO, M. A. **Análise estratégica da manutenção de uma linha de fabricação metalmeccânica baseada em cálculos de confiabilidade de equipamentos**. São Leopoldo, Rio Grande do Sul, 2007.

SIMAS, M.; PACCA, S. **Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável.** Sociedade Internacional de Ecologia Industrial, 2013.

SINHA, A. **Vibration of Mechanical Systems.** Nova York: Cambridge University Press, 2010.

SØRENSEN, B.F.; HOLMES, J. W.; BRØNDSTED, P; BRANNER, K. **Blade materials, testing methods and structural design.** Boston, 2010.

VIANA, H. R. G. **PCM – planejamento e controle de manutenção.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 2022.