

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS JOINVILLE

GUSTAVO HENRIQUE SCHNEIDER WAGNER
LUCAS ADRIANO DE OLIVEIRA

Desenvolvimento e validação de um modelo estatístico
para controle de emissões de NOx em uma Indústria Vidreira

Joinville
2025

GUSTAVO HENRIQUE SCHNEIDER WAGNER
LUCAS ADRIANO DE OLIVEIRA

Desenvolvimento e validação de um modelo estatístico
para controle de emissões de NOx em uma Indústria Vidreira

Monografia apresentada ao curso de Engenharia
Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina,
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof.^a Dr. Charles Sóstenes Assunção

Joinville

2025

Wagner, Gustavo

Desenvolvimento e validação de um modelo estatístico para controle de emissões de NOx em uma indústria vidreira / Gustavo Wagner, Lucas Adriano. – Joinville, SC, 2025.

47 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, Joinville, 2025.

Orientador: Charles Sóstenes Assunção


1. NOx. 2. Indústria vidreira. 3. DMAIC. I. Adriano, Lucas. II. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. III. Título.

GUSTAVO HENRIQUE SCHNEIDER WAGNER
LUCAS ADRIANO DE OLIVEIRA


Desenvolvimento e validação de um modelo estatístico
para controle de emissões de NOx em uma Indústria Vidreira

Monografia apresentada ao curso de Engenharia
Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina,
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.


Joinville, 18 de junho de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **CHARLES SOSTENES ASSUNCAO**
Data: 01/07/2025 11:00:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Charles Sóstenes Assunção
Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **EVANDRO RODRIGO DARIO**
Data: 01/07/2025 12:00:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Evandro Rodrigo Dario
Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **RUBENS HESSE**
Data: 01/07/2025 18:18:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Rubens Hesse
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedicamos esse trabalho a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para que pudéssemos chegar até aqui, especialmente aos pais, irmãos e cônjuges. Cada gesto de apoio fez a diferença.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por nos dar força, saúde e sabedoria para enfrentar todos os desafios dessa caminhada.

Ao orientador, Prof.º Dr. Charles Sóstenes Assunção, pela paciência, dedicação e valiosas contribuições que tornaram este trabalho possível.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Joinville, pela formação acadêmica de qualidade e apoio institucional.

Agradeço a todos os professores que passaram por nossa trajetória, deixando marcas com seu conhecimento e paixão pelo ensino.

Aos nossos pais, pelo amor, apoio e exemplos de vida que sempre nos guiaram.

Às esposas, pela paciência, compreensão e carinho nos momentos em que estivemos ausentes, além de todo o apoio prestado.

Aos colegas engenheiros, que nos apoiaram na execução deste trabalho, por todas as horas dedicadas e explicações necessárias.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que chegássemos até aqui.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende” - Leonardo da Vinci

RESUMO

A emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) provenientes de processos industriais de combustão representa um desafio significativo para a sustentabilidade ambiental e a saúde pública, pois esses poluentes atuam como precursores do ozônio troposférico e do material particulado fino, além de contribuírem para a formação de chuva ácida e provocarem inflamações nas vias respiratórias humanas. Na indústria vidreira, o processo de fusão da matéria-prima é uma das principais fontes desses poluentes, uma vez que a fusão ocorre a partir do calor gerado por intensos processos de combustão, condição que favorece significativamente a formação de NOx térmico.

Este trabalho tem como objetivo estabelecer uma correlação entre as medições de emissão de NOx realizadas por meio de diferentes metodologias de monitoramento — uma conduzida internamente pela equipe da planta industrial e outra executada por empresa certificadora externa — visando à criação de um modelo preditivo confiável.

A metodologia adotada baseou-se no ciclo DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control), com a coleta de dados em ponto interno acessível. Foram monitoradas concentrações de NOx e outros gases, e os dados coletados foram analisados estatisticamente por meio do software Minitab. O modelo estatístico desenvolvido apresentou elevada confiabilidade, com R^2 e VIF compatíveis com os critérios técnicos, e possibilitou a previsão das emissões com base em variáveis operacionais.

Foi realizada uma análise fatorial (DOE) para verificar os parâmetros com maior influência nas variações de emissões de NOx. Embora a configuração ideal proposta pelo modelo permitisse atingir níveis de emissão inferiores aos exigidos pela norma, identificou-se que a operação em regime subestequiométrico poderia comprometer a integridade dos regeneradores. Assim, foi sugerida uma configuração mais conservadora, validada por medição externa, que também manteve as emissões dentro dos limites legais.

Palavras-chave: NOx. Indústria vidreira. DMAIC. Combustão. Planejamento fatorial. Emissões atmosféricas.

ABSTRACT

The emission of nitrogen oxides (NO_x) from industrial combustion processes poses a significant challenge to environmental sustainability and public health, as these pollutants act as precursors to tropospheric ozone and fine particulate matter, contribute to acid rain formation, and cause inflammation in human respiratory pathways. In the glass industry, the raw material melting process is one of the main sources of these pollutants, since melting is driven by high-temperature combustion, a condition that strongly favors the formation of thermal NO_x.

This study aims to establish a correlation between NO_x emission measurements obtained through different monitoring methodologies — one conducted internally by the plant team and the other performed by an external certified company — in order to develop a reliable predictive model.

The adopted methodology was based on the DMAIC cycle (Define, Measure, Analyze, Improve, Control), with data collection at an accessible internal point. Concentrations of NO_x and other gases were monitored, and the data were statistically analyzed using Minitab software. The developed statistical model demonstrated high reliability, with R² and VIF values meeting technical standards, allowing emission prediction based on operational variables.

A factorial analysis (DOE) was carried out to identify the parameters with the greatest influence on NO_x emission variability. Although the ideal configuration proposed by the model enabled emissions below the regulatory limits, it was identified that sub-stoichiometric operation could compromise the structural integrity of the regenerators. Therefore, a more conservative configuration was proposed, validated through external measurement, which also maintained emissions within legal limits.

Keywords: NO_x. Glass industry. DMAIC. Combustion. Factorial design. Air emissions.

LISTA DE IMAGENS

Figura 1 - Ponto de Medição da empresa terceirizada.....	17
Figura 2 - Estrutura de um forno	24
Figura 3 - Ponto de Medição equipe interna	29
Figura 4 - Variação dos parâmetros DOE Fracionado	31
Figura 5 - Comparação de Medições nos dois pontos ao longo do tempo.....	34
Figura 6 - Análise gráfica da probabilidade de NOx	35
Figura 7 - Comparação da dispersão entre os pontos de medição de NOx.....	36
Figura 8 – Comparação da dispersão entre CO e NOx.....	36
Figura 9 - Modelo com utilização de Regressão Linear	37
Figura 10 – Equação de regressão gerada pelo Minitab	39
Figura 11 - Configuração ideal dos parâmetros no Minitab.....	40
Figura 12 - Medição da equipe externa para validação do modelo	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Definição da Análise SWOT	28
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados para cada teste	32
Tabela 2 - Medições de Emissão de NOx com variação dos parâmetros	38
Tabela 3 - Efeito dos parâmetros na emissão de NOx.....	40

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPITA	Center for Air Pollution Impact and Trend Analysis
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DMAIC	Define, Measure, Analyze, Improve, Control (Ciclo Seis Sigma)
DOE	Design of Experiments (Planejamento de Experimentos)
ECIL	Empresa responsável por analisadores de gases
EPA EUA)	Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos EUA)
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
KPI	Key Performance Indicator
MECA/WECA	Aberturas dos dampers de ar nos regeneradores (North/South Ends)
MSA	Measurement System Analysis (Análise de Sistemas de Medição)
NR35	Norma Regulamentadora n 35 (Trabalho em Altura)
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
R ²	Coeficiente de Determinação Estatística
SIPOC	Supplier, Input, Process, Output, Customer
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
VIF	Variance Inflation Factor (Fator de Inflação da Variância)
VOCs	Compostos Orgânicos Voláteis

LISTA DE SÍMBOLOS

Nox	Óxidos de Nitrogênio
NO	Monóxido de Nitrogênio
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio Troposférico
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
HNO ₃	Ácido Nítrico
MP2,5	Material particulado com diâmetro menor que 2,5 micrômetros
SiO ₂	Sílica
ppm	Partes por milhão
Nm ³ /h	Vazão volumétrica normalizada
MW/h	Megawatt por hora
kg/tvf	Quilograma por tonelada de vidro fundido
m ³ /h	Vazão volumétrica
R ²	Coefficiente de Determinação Estatística
VIF	Fator de Inflação da Variância

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral.....	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 ÓXIDOS DE NITROGÊNIO	20
2.2 INDÚSTRIA VIDREIRA.....	21
2.3 METODOLOGIA DMAIC.....	22
3 METODOLOGIA	24
3.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA	24
3.2 APLICAÇÃO DO DMAIC.....	26
3.3 APLICAÇÃO DO DOE	30
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	34
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica constitui uma das principais externalidades negativas associadas aos processos industriais modernos. Dentre os diversos poluentes emitidos, destacam-se os óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos gasosos formados predominantemente por monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂), cuja origem está fortemente vinculada à queima de combustíveis em altas temperaturas (EPA, 1999). Tais compostos, além de serem poluentes primários, atuam como precursores de uma série de reações químicas atmosféricas, contribuindo para a formação de poluentes secundários altamente nocivos à saúde humana e ao meio ambiente.

Entre os fenômenos relacionados à presença de NO_x na atmosfera destaca-se o *smog* fotoquímico — uma névoa poluente que se forma pela interação entre óxidos de nitrogênio, compostos orgânicos voláteis (VOCs) e radiação solar. O principal componente do *smog* é o ozônio troposférico (O₃), cuja formação pode ocorrer a grandes distâncias da fonte original de emissão, como demonstrado em estudos realizados pela Environmental Protection Agency (EPA) e pela Center for Air Pollution Impact and Trend Analysis (CAPITA) nos Estados Unidos (EPA, 1999). Esse tipo de poluição está associado à redução da visibilidade, intensificação de sintomas respiratórios e aumento da mortalidade prematura, especialmente em populações urbanas expostas por longos períodos (DEFRA, 2024).

No Brasil, a preocupação regulatória com os NO_x se intensificou com a promulgação das Resoluções CONAMA nº 382/2006 e nº 436/2011, que estabeleceram limites máximos para fontes fixas de combustão. A conformidade a essas normas exige não apenas o controle das emissões, mas também a implementação de métodos confiáveis e acessíveis de monitoramento (VERGNHANINI FILHO, 2016).

No setor vidreiro, a combustão constitui um processo fundamental para a fusão da matéria-prima e conseqüente conformação dos produtos finais. Entretanto, esse processo é também um dos principais vetores de emissão de NO_x, demandando a adoção de estratégias rigorosas de controle. A mensuração dessas emissões apresenta desafios técnicos consideráveis, especialmente quando os pontos de amostragem são de difícil acesso.

O presente estudo foi realizado em uma indústria produtora de vidros planos, localizada no estado de Santa Catarina, cuja planta possui um forno de fusão contínua com capacidade de produção de 640 toneladas por dia e consumo médio de aproximadamente 3.600 Nm³/h de gás natural. A instalação industrial opera de forma contínua e adota tecnologias de combustão que incluem queimadores a gás natural, sistemas de pré-aquecimento por regeneradores e *boost* elétrico. Em atendimento à legislação ambiental vigente, a planta já realiza o monitoramento periódico das emissões atmosféricas por meio de uma empresa especializada, contratada para realizar campanhas de medição em intervalos regulares de seis meses. Essas medições são executadas utilizando analisadores portáteis em um ponto previamente definido na linha de exaustão dos gases, com frequência determinada por exigências normativas.

A medição conduzida pela empresa terceirizada ocorre em um ponto situado a mais de 20 metros de altura, conforme Figura 1, impondo limitações operacionais significativas e comprometendo a periodicidade das análises.

Figura 1 - Ponto de Medição da empresa terceirizada



Fonte: Autores

A dificuldade de acesso não apenas restringe a frequência das coletas como também compromete a reprodutibilidade dos dados, além de potencialmente introduzir incertezas associadas a fatores como entrada de ar falso no sistema de exaustão.

Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de um modelo interno de monitoramento, que permita realizar a coleta de dados em pontos mais acessíveis e com maior frequência, possibilitando um controle mais próximo em tempo real.

A adoção de um sistema de controle interno oferece uma série de vantagens estratégicas para a operação industrial. Do ponto de vista econômico, reduz-se a dependência de serviços terceirizados e os custos associados a cada campanha de medição. Operacionalmente, a disponibilidade contínua de dados permite ajustes dinâmicos nos parâmetros de combustão, promovendo maior estabilidade do processo e contribuindo para a redução das emissões de NOx. Além disso, o controle interno proporciona maior confiabilidade dos dados, uma vez que o monitoramento passa a ser executado por profissionais familiarizados com a rotina operacional e em condições previamente validadas.

Assim, a presente pesquisa propõe a correlação entre medições de NOx realizadas internamente e outras conduzidas por empresa terceirizada na própria planta industrial, com o objetivo de definir um novo ponto de medição mais acessível e confiável. Além da otimização da metodologia de medição, este estudo busca propor aprimoramentos operacionais capazes de mitigar as emissões de NOx no processo de combustão. Para tanto, será adotado um delineamento experimental estruturado (DOE – Design of Experiments), permitindo a análise da influência de variáveis operacionais críticas sobre a formação desses poluentes. Dessa forma, a pesquisa contribuirá não apenas para a melhoria do monitoramento ambiental, mas também para a implementação de estratégias que viabilizem a conformidade regulatória e a sustentabilidade da produção vidreira.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estabelecer uma correlação robusta entre as medições de NOx realizadas pela equipe interna e aquelas conduzidas pela equipe externa, visando aumentar a confiabilidade dos dados obtidos e possibilitar um controle mais preciso das emissões, bem como o desenvolvimento de estratégias para mitigação dessas emissões.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir um novo ponto de medição que seja acessível e, ao mesmo tempo, represente as condições reais de emissão do processo;

- Estabelecer um modelo estatístico de correlação entre as medições pelas equipes interna e externa, garantindo a confiabilidade dos dados obtidos no novo ponto de medição;
- Desenvolver um estudo DOE para avaliar a influência de variáveis operacionais sobre a formação de NOx e propor ajustes nos parâmetros do processo visando à redução das emissões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ÓXIDOS DE NITROGÊNIO

Os óxidos de nitrogênio constituem uma família de compostos gasosos formados pela combinação entre o nitrogênio e o oxigênio sob condições de alta temperatura, como as encontradas nos processos de combustão. Os principais componentes desse grupo são o monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂), sendo este último utilizado como indicador para regulamentações ambientais devido à sua toxicidade e maior reatividade atmosférica.

A formação de NOx em processos industriais ocorre por três mecanismos principais:

- NOx térmico: gerado pela reação entre o nitrogênio e o oxigênio atmosféricos a temperaturas superiores a 1.300 °C;
- NOx de combustível: resultante da oxidação do nitrogênio quimicamente presente em combustíveis sólidos ou líquidos
- NOx rápido: formado em condições de mistura rica em combustível, geralmente em chamas não homogêneas.

Os NOx possuem significativa importância ambiental por sua atuação como precursores de ozônio troposférico (O₃), ácido nítrico (HNO₃) e material particulado secundário (nitratos). Em conjunto com compostos orgânicos voláteis (VOCs), os NOx participam da formação de *smog* fotoquímico em ambientes urbanos ensolarados, um fenômeno que reduz a visibilidade e eleva os índices de poluição atmosférica.

Outro impacto relevante é a formação da chuva ácida, resultante da conversão de NOx em ácido nítrico ao reagirem com vapor d'água presente na atmosfera. Esse ácido contribui para a acidificação de solos e corpos d'água, alterando o pH e promovendo a lixiviação de nutrientes essenciais, afetando de forma severa ecossistemas aquáticos e vegetação terrestre.

Adicionalmente, os NOx participam da geração de material particulado fino (MP_{2,5}), por meio da formação de sais de nitrato que se estabilizam como aerossóis atmosféricos. Esses particulados permanecem por longos períodos em suspensão, afetando a qualidade do ar.

A exposição prolongada a concentrações elevadas de NO₂ está associada a uma série de efeitos adversos à saúde humana. Estudos indicam que esse composto é responsável por inflamações nas vias aéreas, exacerbação de doenças respiratórias como asma e bronquite crônica, e aumento da susceptibilidade a infecções.

A inalação contínua de material particulado secundário formado a partir de NO_x, especialmente o MP_{2,5}, tem sido associada a elevação dos índices de hospitalização e mortalidade por doenças cardiovasculares e pulmonares, conforme demonstrado em estudos epidemiológicos como o “Six Cities Study” e relatórios da EPA (EPA, 1999).

No Brasil, a regulamentação das emissões de NO_x é realizada principalmente pelas Resoluções CONAMA nº 382/2006 e nº 436/2011. A primeira estabelece limites de emissão para novas fontes estacionárias de combustão, enquanto a segunda complementa as exigências para fontes existentes, considerando a potência térmica e o tipo de combustível (VERGNHANINI FILHO, 2016).

Em nível internacional, a Environmental Protection Agency (EPA) define padrões nacionais de qualidade do ar ambiente nos Estados Unidos, estabelecendo para o NO₂ um limite anual, com o objetivo de proteger a saúde pública e o bem-estar ambiental (EPA, 1999). O Reino Unido, por meio do DEFRA, estabelece metas específicas de redução progressiva das concentrações de NO_x, com foco em áreas de maior densidade populacional e industrialização (DEFRA, 2024).

2.2 INDÚSTRIA VIDREIRA

A indústria vidreira é responsável pela fabricação de produtos a partir da fusão de materiais inorgânicos, principalmente sílica (SiO₂), combinada a outros componentes como óxidos de sódio e cálcio. Esse processo é caracterizado pelo uso intensivo de calor, com temperaturas de fusão que variam entre 1.300 °C e 1.600 °C, e requer a aplicação contínua de combustão em fornos industriais especializados.

Os fornos de fusão de vidro operam de forma contínua, sendo alimentados por combustíveis como gás natural, óleo combustível ou até mesmo misturas com oxigênio enriquecido, dependendo da planta e da tecnologia empregada. A elevada temperatura exigida e a longa permanência dos gases de combustão no interior do forno favorecem a formação de óxidos de nitrogênio, tornando esses equipamentos importantes fontes de emissão de NO_x.

No contexto da indústria vidreira, a formação de NO_x ocorre majoritariamente pelos mecanismos térmico e combustível. O NO_x térmico resulta da combinação entre nitrogênio e oxigênio do ar em zonas com temperaturas superiores a 1.300 °C — situação típica de fornos de fusão contínuos. Já o NO_x combustível se forma a partir

da oxidação do nitrogênio presente nos combustíveis, principalmente nos óleos pesados com alto teor de compostos nitrogenados.

A intensidade da formação de NO_x está diretamente relacionada a parâmetros como a temperatura de pico da chama, o tempo de residência dos gases na zona quente e a concentração de oxigênio disponível no meio. Assim, os ajustes operacionais que modifiquem esses fatores podem impactar significativamente as emissões.

A mitigação das emissões de NO_x em fornos vidreiros pode ser realizada por meio de intervenções no próprio processo de combustão. Tais estratégias incluem:

- Estagiamento do ar de combustão: técnica na qual o ar é fornecido em múltiplas etapas (primário, secundário e terciário), resultando em zonas de chama com diferentes estequiometrias. Essa abordagem reduz o pico de temperatura e a formação de NO_x térmico.
- Estagiamento do combustível (requeima): aplicação de uma parcela minoritária do combustível antes da zona principal de combustão, criando condições redutoras que favorecem a conversão do NO_x formado em N₂, em vez de NO ou NO₂. Após essa zona, injeta-se ar suplementar para assegurar a oxidação completa do combustível.
- Utilização de queimadores do tipo Low NO_x: equipamentos projetados para modular a injeção de ar e combustível de modo a manter temperaturas mais homogêneas e com menor excesso de oxigênio, reduzindo assim a formação de NO_x.
- Recirculação de gases de combustão: método no qual parte dos gases queimados é reinjetada na câmara de combustão para reduzir sua temperatura local e, assim, mitigar a formação de NO_x térmico.

Essas estratégias têm sido amplamente aplicadas em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) conduzidos por instituições como o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), inclusive com validação em fornalhas-piloto, simulando as condições reais dos fornos industriais (VERGNHANINI FILHO, 2016).

2.3 METODOLOGIA DMAIC

A metodologia DMAIC é uma abordagem estruturada e interativa utilizada para a melhoria de processos, sendo um dos pilares do Seis Sigma, conforme descrito por

Pande et al. (2001). O acrônimo DMAIC representa as cinco fases sequenciais: Define (Definir), Measure (Medir), Analyze (Analisar), Improve (Melhorar) e Control (Controlar). Essa metodologia é amplamente empregada em ambientes industriais para identificar e eliminar causas de defeitos ou ineficiências, promovendo a excelência operacional.

Na fase de definição, o objetivo é identificar claramente o problema a ser resolvido, estabelecer os objetivos do projeto e delimitar seu escopo de atuação.

A fase de medição, por sua vez, envolve a coleta de dados relevantes para entender o desempenho atual do processo. É essencial garantir a precisão e a confiabilidade dos dados coletados, utilizando técnicas como a Análise de Sistemas de Medição (MSA) para validar os instrumentos de medição. A coleta de dados pode ser realizada de diversas maneiras, incluindo bancos de dados armazenados e coletas manuais, como foi o caso empregado neste projeto.

Na fase de análise, os dados coletados e examinados para identificar as causas raízes dos problemas identificados. Ferramentas estatísticas e de qualidade, como o Diagrama de Causa e Efeito (Ishikawa) e o Diagrama de Pareto, são empregadas para auxiliar na identificação e priorização das causas principais.

Com as causas raízes identificadas, desenvolvem-se soluções para eliminar ou mitigar os problemas. Técnicas como o Design of Experiments (DOE) – metodologia estatística utilizada para planejar e conduzir experimentos de forma sistemática com o objetivo de identificar as variáveis que mais influenciam um determinado processo - podem ser utilizadas para testar e validar as melhorias propostas, garantindo que as mudanças implementadas resultem em melhorias significativas no processo.

A etapa final visa garantir que as melhorias implementadas sejam sustentadas ao longo do tempo. Isso inclui o monitoramento contínuo do processo, a padronização das operações e a implementação de planos de controle para prevenir o retorno dos problemas.

3 METODOLOGIA

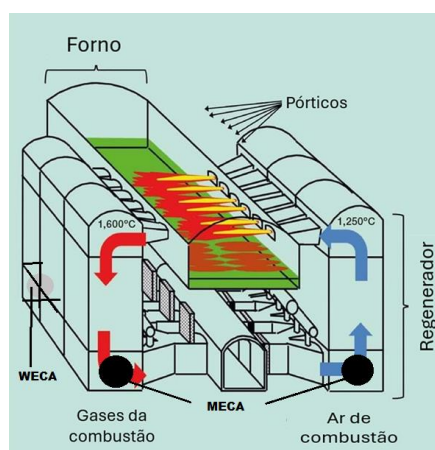
3.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA

Os fornos industriais utilizados na produção de vidro plano apresentam variadas capacidades de fusão, podendo atingir até 1.000 toneladas por dia. A alimentação térmica desses equipamentos é comumente realizada por meio da queima de gás natural em conjunto com ar de combustão pré-aquecido, embora também sejam empregados combustíveis alternativos como gás liquefeito de petróleo (GLP), biometano e, mais recentemente, hidrogênio — este último em fase de testes e validação tecnológica. A escolha do combustível depende de múltiplos fatores, como disponibilidade regional, viabilidade econômica, impacto ambiental e especificações operacionais da planta.

Além do processo convencional de combustão, alguns fornos contam com sistemas auxiliares, como os queimadores de oxigênio puro — conhecidos como *oxyboosters* — e os sistemas de *boost* elétrico. Estes últimos promovem o aquecimento da base do forno (soleira) por efeito Joule, contribuindo para o controle de temperatura e estabilidade do banho vítreo.

A estrutura do forno estudado é dividida em pórticos, que são os módulos laterais onde se posicionam os queimadores principais, como exemplificado na Figura 2. Cada pórtico contém, no mínimo, um par de queimadores, sendo que a quantidade total de pórticos depende diretamente da capacidade de fusão do forno. O forno estudado é regenerativo, o que significa que o calor dos gases resultantes da combustão é utilizado para pré-aquecer o ar da combustão, aumentando a eficiência energética.

Figura 2 - Estrutura de um forno



Fonte: Empresa estudada

O ar de combustão é previamente aquecido em regeneradores térmicos, que são estruturas compostas por blocos refratários com geometria do tipo colmeia. Esses blocos armazenam o calor dos gases de exaustão provenientes da queima e o transferem ao ar de combustão fresco durante os ciclos de reversão. O ar da combustão entra por dampers – dispositivos semelhantes a válvulas, utilizados para controlar o fluxo de ar – e sobem pelos refratários aquecidos realizando a troca térmica. Esses dampers são conhecidos na indústria estudada como MECA e WECA. Esse sistema alterna o sentido da queima a cada 20 minutos para assegurar a eficiência térmica. Por exemplo, em um ciclo iniciado às 10h00, a queima ocorre no lado esquerdo, aquecendo os blocos refratários do lado direito. Às 10h20, ocorre a reversão, e a queima passa a ser realizada no lado direito, aquecendo o lado oposto.

Os regeneradores podem ser construídos segundo dois modelos: *Divided Box* e *Common Box*. No modelo *Divided Box*, há separação interna com blocos refratários, permitindo alimentação de ar de combustão independente para cada pórtico — condição que favorece um controle mais preciso da razão ar/gás em cada zona do forno. Já o modelo *Common Box*, utilizado no forno estudado, não possui divisões internas; o ar de combustão é distribuído por duas extremidades, chamadas de MECA (Norte) e WECA (Sul). O controle do fluxo de ar é realizado por dampers localizados nessas extremidades, e a relação de abertura dos dampers define a distribuição de ar entre os pórticos. Por exemplo, uma configuração de MECA/WECA igual a 30/70 representa maior disponibilidade de ar para os primeiros pórticos, enquanto uma relação de 70/30 favorece os últimos. Isso ocorre porque o ar de combustão, ao entrar pelos dampers nas extremidades do regenerador, tende a se chocar e se distribuir mais intensamente próximo ao lado com menor abertura relativa, gerando um fluxo que avança no sentido oposto. Assim, uma maior abertura no lado MECA (por exemplo, 70%) provoca um escoamento preferencial em direção à extremidade WECA, aumentando a quantidade de ar nos pórticos mais distantes da entrada, e vice-versa.

Os parâmetros operacionais do forno são definidos com base no histórico de desempenho da unidade e em recomendações do setor de Pesquisa e Desenvolvimento. Entre os principais parâmetros ajustáveis estão: vazão de gás, razão ar/gás, potência do *boost* elétrico, proporção MECA/WECA, pressão interna, carga de alimentação e percentual de caco na composição da matéria-prima. A meta

operacional consiste em manter o equilíbrio entre três fatores fundamentais: minimização de defeitos no produto final, eficiência energética (reduzindo custos e emissões), e maximização da vida útil do forno, que pode alcançar até 20 anos sob controle rigoroso — embora falhas operacionais possam reduzir esse ciclo significativamente.

A presente pesquisa foi conduzida em uma planta localizada no norte do estado de Santa Catarina. O forno em análise foi reformado em 2023 e possui capacidade nominal de fusão de 640 toneladas por dia, embora esteja operando com limite técnico de 600 toneladas por dia, imposto por restrições associadas às emissões de NOx. Este equipamento conta com um sistema de *boost* elétrico com capacidade nominal de 4,5 MW/h, um par de queimadores *oxyboost*, e 24 queimadores a gás natural distribuídos em 12 pórticos (seis de cada lado). Os regeneradores são do tipo *Common Box*.

Desde sua reconstrução, o forno vem operando abaixo de sua capacidade total devido à impossibilidade de atendimento ao limite definido pela Resolução CONAMA 02000.000921/2002-78 de emissão de 4,3 kg de NOx por tonelada de vidro fundido (kg/Tvf). Diante dessa limitação, foi proposto um projeto de melhoria baseado na metodologia DMAIC, com o objetivo de realizar uma análise estatística dos dados de operação e propor intervenções que permitam o funcionamento do forno em toda a sua faixa de carga, respeitando os limites de emissão regulamentares.

3.2 APLICAÇÃO DO DMAIC

A fase "Define" da metodologia DMAIC foi iniciada com a elaboração do Project Charter (Apêndice A), documento que formaliza as definições preliminares do projeto, incluindo datas de início e término, equipe envolvida, indicadores principais e secundários, cronograma e objetivos estabelecidos. A equipe do projeto foi composta por dois alunos, o engenheiro responsável pelo processo de fusão e um técnico refratarista. O problema central identificado foi a emissão de NOx acima do limite estabelecido pela Resolução do CONAMA, o que impõe restrições operacionais e ambientais à planta industrial. Como objetivo principal do projeto, estabeleceu-se a garantia do controle das emissões de NOx abaixo de 4,3 kg/tvf em todas as condições de carga do forno, assegurando conformidade normativa em regime contínuo. Associado a isso, definiu-se como objetivo complementar o desenvolvimento de um método de controle interno das emissões, por meio da utilização de dados obtidos em

análises de gases realizadas pela equipe técnica da própria planta, com menor dependência de medições de empresas externas.

Para monitorar o desempenho do projeto, foram definidos indicadores principais: a emissão de NO_x (em kg/tvf) e a concentração de NO_x (em ppm). Como indicadores secundários, foram estabelecidos a concentração de CO (em ppm), a concentração de O₂ (em %) e a vazão volumétrica dos gases (em Nm³/h). O escopo do projeto compreende a aplicação sistemática da metodologia DMAIC, com base em dados provenientes de medições realizadas tanto pela equipe interna quanto pela externa, os quais subsidiarão as análises estatísticas e as proposições de melhoria do processo de combustão.

Após a aprovação do Project Charter, elaborou-se o Master Plan (Apêndice B), que consiste em um plano diretor contendo a divisão estruturada das etapas do projeto, suas interdependências, prazos e responsáveis. O “Master Plan” funciona como um guia operacional para o acompanhamento do progresso e para a gestão das entregas, assegurando que o projeto siga uma trajetória coerente com os objetivos previamente definidos. Como parte dessa organização, foi construída uma matriz SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) para identificar as principais forças, fraquezas, oportunidades e ameaças relacionadas ao projeto, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Definição da Análise SWOT

<p>FORÇAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade de dados e parâmetros operacionais • Tema importante para a empresa • Disponibilidade de um bom time para realização do trabalho 	<p>FRAQUEZAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de medição atual • Falta de conhecimento sobre o tema • Baixa autonomia para realizar alterações
<p>OPORTUNIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Criação de sistema de medição interno • Criação de modelamento de controle interno 	<p>T AMEAÇAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eficiência energética • Vida útil do forno • Licença ambiental

Fonte: Autores

Na fase "Measure", iniciou-se a avaliação do método atual de medição das taxas de emissão de NO_x, realizado por uma empresa terceirizada. As medições ocorrem em um ponto da chaminé a aproximadamente 20 metros do solo, com acesso via escada do tipo marinheiro. Devido à ausência de pessoal treinado conforme a NR35 - Segurança no trabalho em altura, não era possível acompanhar as medições ou realizar coletas internas frequentes para compreender o comportamento das emissões.

A coleta de dados realizada pela empresa terceirizada é conduzida em duas etapas complementares. Primeiramente, a vazão dos gases é determinada a partir da medição do perfil de velocidades em 12 pontos distintos da seção transversal da chaminé, por meio de um tubo de Pitot. Com base na velocidade média obtida e na área de escoamento da chaminé, calculou-se a vazão volumétrica dos gases (m³/h). Em seguida, foram medidas as concentrações de NO_x, expressas em partes por milhão (ppm), utilizando um analisador de gases modelo *Chemist 500*, fabricado pela *ECIL*. A partir desses dados, foi possível converter as concentrações em valores de emissão mássica de NO_x em kg/tvf.

Considerando a complexidade e os custos associados à coleta externa de dados, de aproximadamente 2.000,00 R\$ por dia de medição, decidiu-se estabelecer

um ponto de coleta acessível internamente, localizado no canal de fumaça que conduz os gases à chaminé, conforme Figura 3. O acesso a esse ponto foi aprimorado para eliminar a necessidade de trabalho em altura, permitindo medições seguras e frequentes.

Figura 3 - Ponto de Medição equipe interna



Fonte: Autores

Iniciou-se então a coleta interna de dados de concentração de NO_x, utilizando um equipamento do mesmo modelo empregado pela empresa terceirizada, previamente calibrado por laboratório externo. Além de NO_x, foram monitorados os níveis de CO, CO₂ e O₂, visando comparar os resultados com as análises externas. As coletas ocorreram diariamente, sempre nos mesmos horários (10h00 e 10h20), para que as coletas fossem realizadas enquanto os queimadores do lado esquerdo e direito estivessem em funcionamento.

Para validar as medições internas, foi contratada uma nova medição externa, realizada simultaneamente com medições internas. Foram coletadas 50 amostras simultâneas, abrangendo concentrações de NO_x, CO, CO₂ e O₂. A análise e tratamento desses dados foram conduzidos na fase "Analyse".

A fase "Analyse" teve início com o tratamento e análise estatística dos dados coletados, utilizando o software Minitab. O primeiro passo foi realizar o teste de normalidade (teste P) para verificar se os dados seguiam uma distribuição normal, condição necessária para a aplicação de análises estatísticas subsequentes, conforme orientação do próprio desenvolvedor do software (MINITAB, 2024).

Em seguida, investigaram-se as correlações entre os diferentes parâmetros medidos, utilizando teste de Pearson. De acordo com o Minitab (2024), o coeficiente de correlação de Pearson (r) mede a força e a direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas.

Com base nessas correlações, desenvolveu-se um modelo estatístico preditivo para estimar as taxas de emissão de NO_x a partir das medições internas, fato que permite a realização do controle de maneira interna.

A equipe também analisou dados históricos de medições externas para identificar possíveis correlações entre parâmetros operacionais e taxas de emissão, porém não foram encontradas relações significativas.

Diante disso, realizou-se um brainstorming, fundamentado em conhecimento técnico e literatura científica, para identificar parâmetros potencialmente influentes nas emissões de NO_x. Os principais parâmetros identificados foram: relação ar/gás, vazão do Oxyboost, velocidade da chama dos queimadores, relação MECA/WECA, carga, percentual de caco na receita e tempo de reversão.

3.3 APLICAÇÃO DO DOE

Para avaliar o impacto de cada parâmetro, decidiu-se pela realização de um experimento de planejamento fatorial (DOE).

Optou-se por um planejamento fatorial fracionado (DOE fracionado) devido às limitações de tempo e ao potencial impacto dos testes na eficiência energética do forno e na qualidade do vidro produzido. O planejamento fatorial fracionado é uma técnica estatística utilizada para avaliar os efeitos de múltiplos fatores experimentais com um número reduzido de combinações, selecionadas de forma estratégica. Diferentemente do DOE completo, que testa todas as combinações possíveis de níveis dos fatores (resultando em um número elevado de experimentos), o planejamento fracionado utiliza apenas uma fração do total, o que permite identificar os efeitos principais em um sistema. Conforme descrito por Montgomery (2017), esse tipo de planejamento permite a avaliação dos efeitos principais e interações entre fatores com um número reduzido de experimentos, sendo especialmente útil quando recursos são limitados.

Para viabilizar o experimento, restringiu-se o número de parâmetros a três, selecionados por meio de uma matriz de priorização, com a participação dos gerentes de composição e fusão, manufatura e industrial. Os parâmetros escolhidos foram:

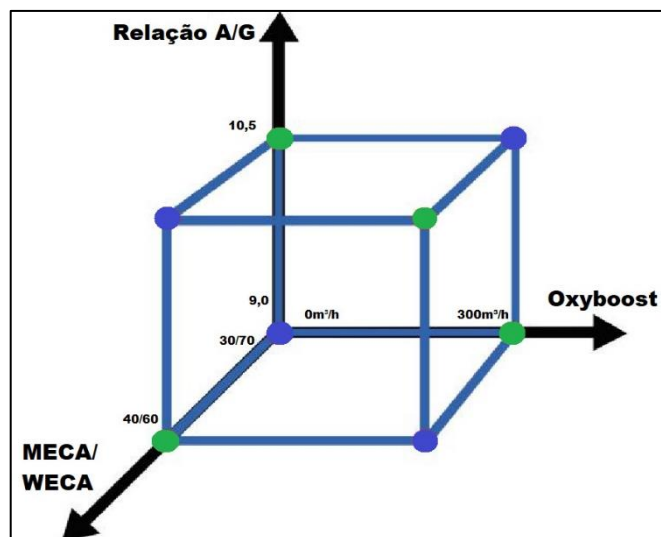
- Relação ar/gás;
- Utilização do queimador Oxyboost;
- Relação MECA/WECA.

Conforme a Figura 4, os parâmetros selecionados foram variados da seguinte maneira:

- Relação ar gás: 9,0 a 10,5
- Queimador Oxyboost: 0 m³/h (Desligado) a 300 m³/h (Ligado na vazão máxima)
- Relação MECA/WECA: 30/70 a 40/60

Os pontos destacados em verde na figura 4 foram utilizados para a análise no DOE.

Figura 4 - Variação dos parâmetros DOE Fracionado



Fonte: Autores

A aplicação do planejamento fatorial (DOE) na etapa “Improve” segue o modelo proposto por Escudero e Lopes (2016), que demonstraram a eficácia da integração entre análise estatística e operação industrial em contextos de produção contínua. Nas configurações do minitab, o parâmetro Relação ar/gás foi definido como numérico (variando entre 9,0 e 10,5), o parâmetro Oxyboost foi definido como texto (variando entre -1 para 0m³/h ou 1 para 300m³/h) e parâmetro MECA/WECA foi definido como texto (variando entre -1 para 30/70 ou 1 para 40/60).

Conforme Tabela 1, foram realizados quatro testes – denominados pontos de análise do DOE - variando entre os pontos mínimos e máximos de cada um dos parâmetros avaliados.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados para cada teste

Pontos	Relação A/G	Oxyboost	MECA/WECA
01	10,5	0	30/70
02	9,0	0	40/60
03	9,0	300	30/70
04	10,5	300	40/60

Fonte: Autores

Para cada ponto experimental, os parâmetros do forno foram ajustados conforme o delineamento, seguido de um período de estabilização de 12 horas. Em seguida, realizava-se cinco medições para coleta de dados. Esse procedimento foi repetido para os quatro pontos previstos no ensaio.

Após a análise dos resultados, utilizando a ferramenta de otimização do Minitab, identificou-se o ponto ideal de operação. A ferramenta de otimização utiliza os dados coletados no DOE para criar um modelo estatístico que representa a relação entre as variáveis de entrada e as respostas obtidas, construindo uma superfície de resposta para visualizar como as mudanças nos fatores afetam a resposta, após definição do objetivo no software (minimizar ou maximizar a resposta), são utilizados algoritmos numéricos para modelar a superfície de resposta e prever resultados baseando-se na alteração dos parâmetros de entrada. A proposta de adoção desse ponto operacional foi apresentada à gerência da unidade, visando à implementação das melhorias identificadas.

A etapa final da metodologia DMAIC, denominada *Control*, tem como propósito assegurar a sustentabilidade das melhorias implementadas e garantir que os ganhos obtidos com a otimização do processo não sejam perdidos ao longo do tempo.

Nesta fase, foram definidos os mecanismos de controle que viabilizam o monitoramento contínuo dos parâmetros críticos, a replicabilidade do modelo estatístico e a manutenção da conformidade ambiental.

Inicialmente, foi estruturado um plano de controle operacional, no qual foram definidos os seguintes pontos de verificação:

- Manutenção periódica da calibração dos analisadores de gases;

- Coletas regulares de dados internos de NO_x, CO, CO₂ e O₂;
- Registro e acompanhamento das variáveis operacionais utilizadas no modelo (relação ar/gás, Oxyboost, MECA/WECA);
- Revisão quinzenal dos dados de emissão e comparação com a previsão do modelo estatístico;

Adicionalmente, foi sugerida à gestão a criação de um indicador de desempenho ambiental (KPI) baseado na diferença entre as emissões previstas e medidas, com o objetivo de antecipar desvios e atuar preventivamente na causa.

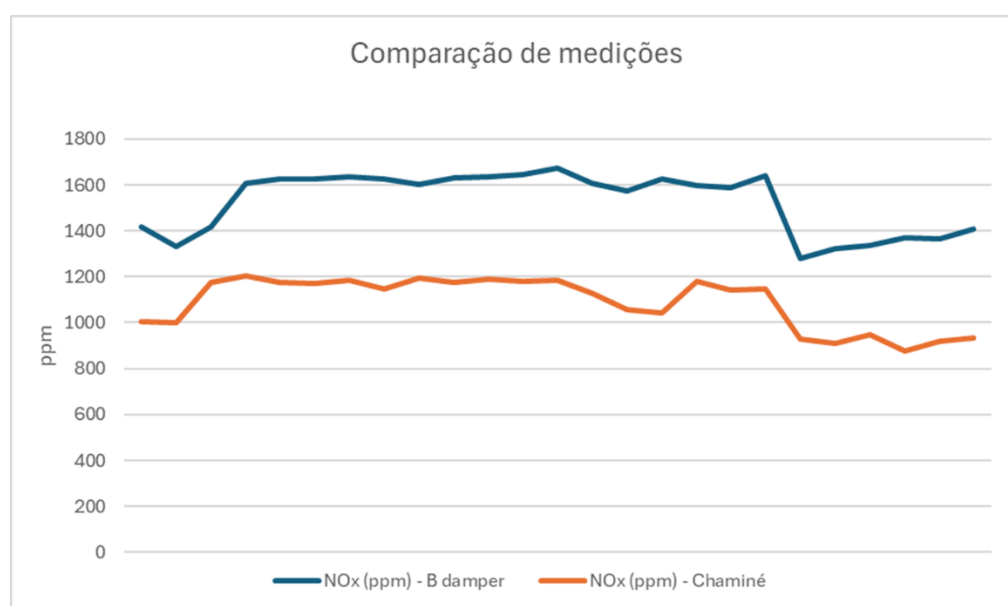
O compartilhamento da equação de regressão encontrada com as outras unidades da empresa estudada foi idealizado, porém, após conversas com as unidades, descobriu-se que os demais fornos da empresa possuem um método de construção diferente, contando com regeneradores do tipo “divided box” e em alguns casos, não contendo queimadores do tipo oxyboost, o que torna a utilização da equação encontrada impraticável. Além disso, as demais unidades contam com uma planta de controle de poluição ao final do canal de fumaça, que precipita o material particulado presente nos gases, e previne a emissão dos mesmos na atmosfera.

De qualquer maneira, a metodologia do estudo realizado foi compartilhado, para que as demais unidades possam realizar seus próprios estudos, já embasados em um roteiro robusto.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Durante as análises iniciais, observou-se uma discrepância significativa entre os dados internos e externos medidos simultaneamente, as concentrações médias de NOx eram superiores nas medições internas, como pode ser observado na Figura 5. Concluiu-se que essa diferença ocorria pelo ingresso de ar falso no ponto de medição realizado pela equipe externa, o que justificava um aumento na concentração de oxigênio, diminuição na concentração de NOx e um aumento da vazão total em comparação com as medições internas.

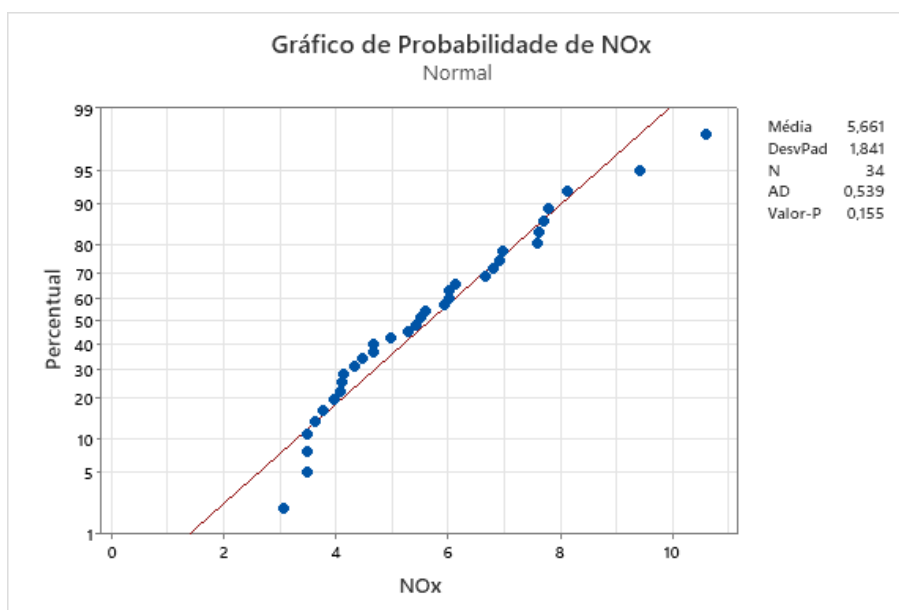
Figura 5 - Comparação de Medições nos dois pontos ao longo do tempo



Fonte: Autores

Como pode ser observado na Figura 6, o valor de P obtido para a variável de NOx foi superior a 0,05. De acordo com a definição do Minitab (2024), valores de p superiores ao nível de significância de 0,05 indicam que não se deve rejeitar a hipótese nula de normalidade, permitindo o uso de ferramentas estatísticas mais robustas.

Figura 6 - Análise gráfica da probabilidade de NOx



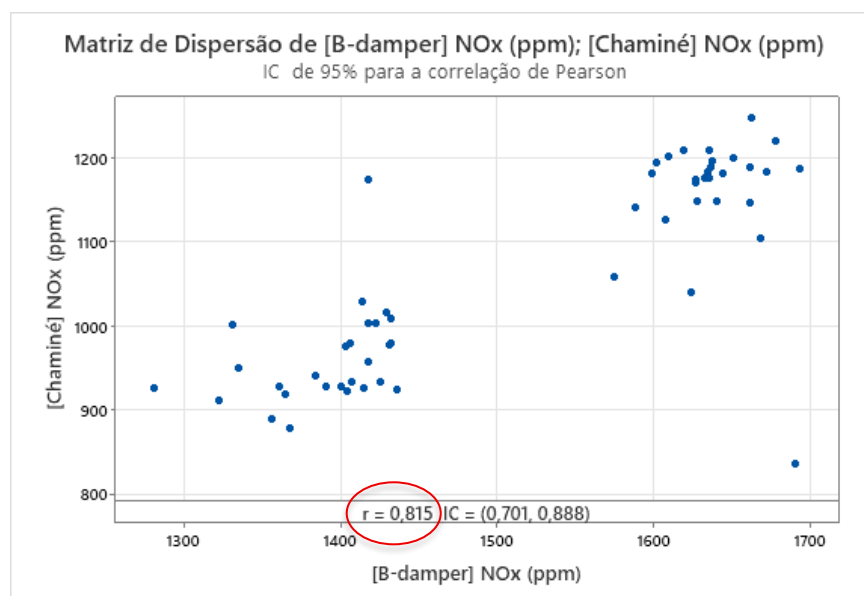
Fonte: Autores

A correlação de Pearson quantifica o grau em que dois conjuntos de dados estão linearmente relacionados. O coeficiente r , que varia de -1 a 1, é a medida mais comum dessa correlação (MINITAB,2024):

- $r=1$ indica uma correlação positiva perfeita.
- $r=-1$ representa uma correlação negativa perfeita.
- $r=0$ sugere ausência de correlação linear

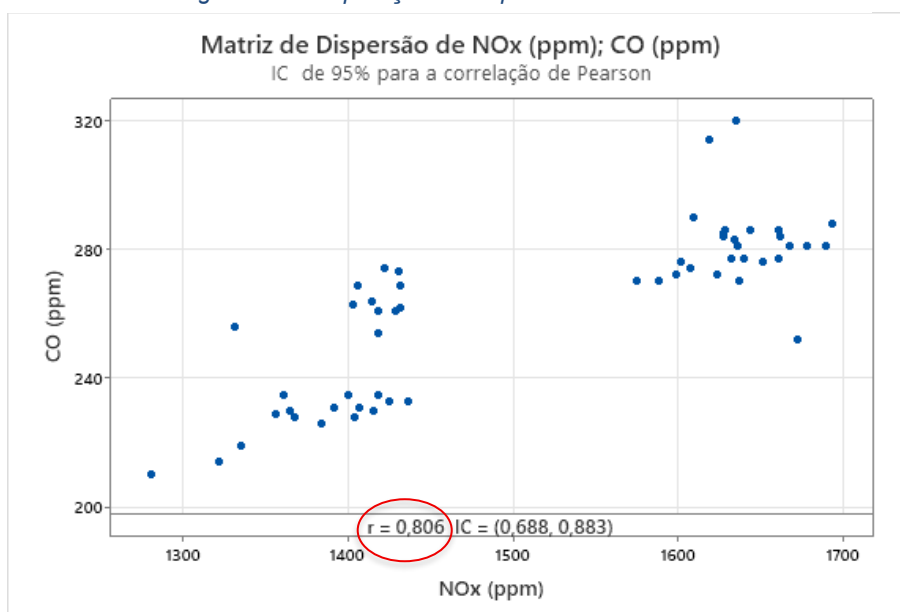
Nos testes de realizados, observou-se uma correlação entre as concentrações de NOx nos dois pontos de medição com $r = 0,815$, conforme Figura 7, sendo denominados os pontos de medições das equipes interna e externa como B-damper e Chaminé, respectivamente. E uma correlação entre as concentrações de NOx e CO com $r = 0,806$, conforme Figura 8.

Figura 7 - Comparação da dispersão entre os pontos de medição de NOx



Fonte: Autores

Figura 8 – Comparação da dispersão entre CO e NOx



Fonte: Autores

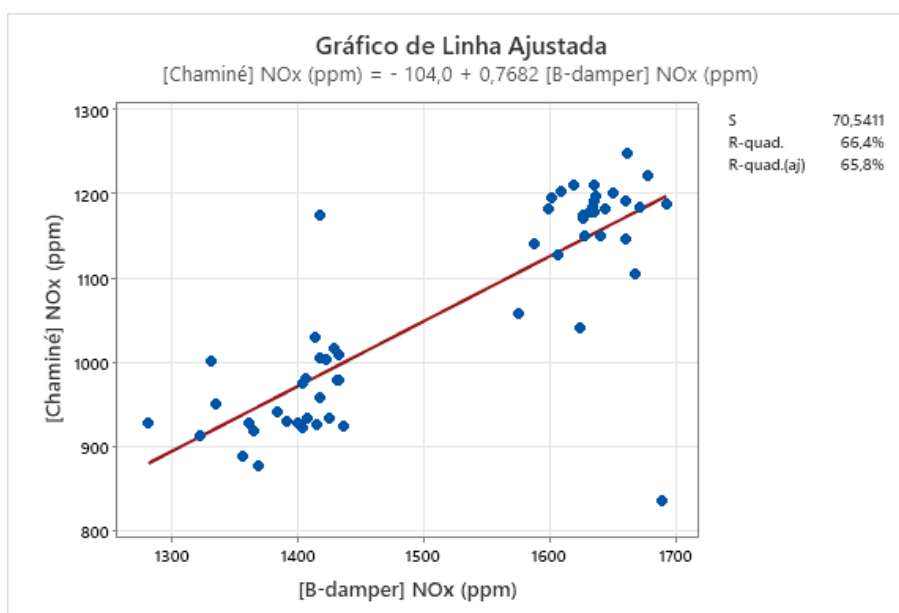
Uma correlação é geralmente considerada forte quando o coeficiente de Pearson está próximo de 1 ou -1. Segundo Cohen (1988), uma correlação é classificada da seguinte forma:

- 0,1 a 0,3: Correlação fraca.
- 0,3 a 0,5: Correlação moderada.
- 0,5 a 1,0: Correlação forte.

Dessa forma, ambos os coeficientes de correlação (0,815 e 0,806), identificam uma forte correlação positiva, isso implica que, à medida que uma variável aumenta, a outra tende a aumentar também, refletindo uma relação consistente e previsível entre elas.

Como pode se observar na Figura 9, o modelo estatístico elaborado com base nas correlações utilizou de uma regressão linear, e obteve um R^2 de 65,8%.

Figura 9 - Modelo com utilização de Regressão Linear



Fonte: Autores

O coeficiente de determinação, R^2 , é uma medida crucial na análise de regressão, indicando a proporção da variabilidade na variável dependente que pode ser explicada pelas variáveis independentes do modelo. Conforme Hogg e Tanis (2015), valores de R^2 variam de 0 a 1, onde:

- $R^2 = 0$: Nenhuma variabilidade explicada.
- $R^2 = 1$: Toda a variabilidade explicada.

Para Hogg e Tanis (2015), um R^2 acima de 60% é visto como um bom ajuste dos dados, devido à complexidade e multidimensionalidade frequentemente envolvidas. Dessa forma, pode-se afirmar que a regressão encontrada é forte o suficiente para realizar estimativas internas das taxas de emissão com um bom índice de confiança.

O delineamento experimental aplicado (DOE fracionado) permitiu a avaliação dos principais parâmetros operacionais que influenciam nas emissões de NOx no processo de combustão da indústria vidreira analisada, e os resultados oriundos das medições realizadas pela equipe interna no ponto denominado B-damper, podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Medições de Emissão de NOx com variação dos parâmetros

Medição	Ponto	Oxyboost	Relação Ar/Gás	MECAWECA	Taxa (kg/tv)
1	4	300	10,5	40/60	6,52
2	4	300	10,5	40/60	6,05
3	4	300	10,5	40/60	6,37
4	4	300	10,5	40/60	6,06
5	4	300	10,5	40/60	6,10
6	3	300	9	30/70	2,87
7	3	300	9	30/70	3,30
8	3	300	9	30/70	2,97
9	3	300	9	30/70	2,57
10	3	300	9	30/70	2,71
11	2	0	9	40/60	3,12
12	2	0	9	40/60	3,05
13	2	0	9	40/60	2,94
14	2	0	9	40/60	2,94
15	2	0	9	40/60	3,00
16	1	0	10,5	30/70	7,11
17	1	0	10,5	30/70	6,96
18	1	0	10,5	30/70	6,74
19	1	0	10,5	30/70	6,73
20	1	0	10,5	30/70	6,73

Fonte: Autores

Após inserção dos dados no Minitab, verificou-se os resultados apresentados, dentre eles destacam-se o VIF e R^2 . O Fator de Inflação da Variância (VIF) é uma medida utilizada para identificar multicolinearidade entre variáveis independentes em um modelo de regressão. A multicolinearidade ocorre quando duas ou mais variáveis são altamente correlacionadas, o que pode prejudicar a interpretação dos coeficientes do modelo.

Um VIF de 1,0 indica que não há correlação entre a variável independente em questão e as outras variáveis do modelo. Segundo Gujarati e Porter (2009), valores de VIF interpretados são:

- VIF = 1: Ausência de multicolinearidade.

- VIF entre 1 e 5: Níveis normais de multicolinearidade.
- VIF acima de 5: Potencial problema de multicolinearidade.

O modelo estatístico ajustado apresentou indicadores de confiabilidade robustos, com um fator de inflação da variância (VIF) de 1,0, o que ainda segundo Gujarati e Porter (2009) é um resultado ideal, indicando que a variável não está inflacionando indevidamente a variabilidade dos coeficientes do modelo. Isso sinaliza um modelo robusto e interpretável, onde os coeficientes são estimados de forma precisa.

O modelo gerou a equação de regressão conforme Figura 10, com um coeficiente de determinação (R^2) de 99,04%, que segundo Hogg e Tanis (2015), explica quase toda a variabilidade, indicando elevada capacidade explicativa do modelo em relação às variações nas emissões observadas.

Figura 10 – Equação de regressão gerada pelo Minitab

Equação de Regressão

Taxa = -18,593 + 2,3933 A:G - 0,1900 Oxyboost - 0,1270 M/W

Fonte: Autores

Conforme Tabela 3, a análise dos efeitos principais revelou que o parâmetro de maior impacto sobre os níveis de emissão de NO_x foi a relação ar/gás (3,5900), seguido pelo uso do queimador tipo Oxyboost (-0,3800) e, por fim, pela relação MECA/WECA (-0,2540). Essa hierarquia de influência é coerente com os mecanismos físico-químicos de formação de NO_x, dado que a relação ar/gás afeta diretamente a estequiometria da combustão, alterando a temperatura da chama e a disponibilidade de oxigênio molecular para reações de formação de NO_x térmico. Segundo o Minitab, o efeito de um fator representa a alteração prevista na resposta média quando o fator é alterado do nível baixo para o nível alto, sendo calculado como o dobro do coeficiente codificado, por exemplo, ao alterar a relação ar/gás de 9,0 para 10,5 é esperado um aumento da taxa de emissões de NO_x em 3,59 kg/Tvf.

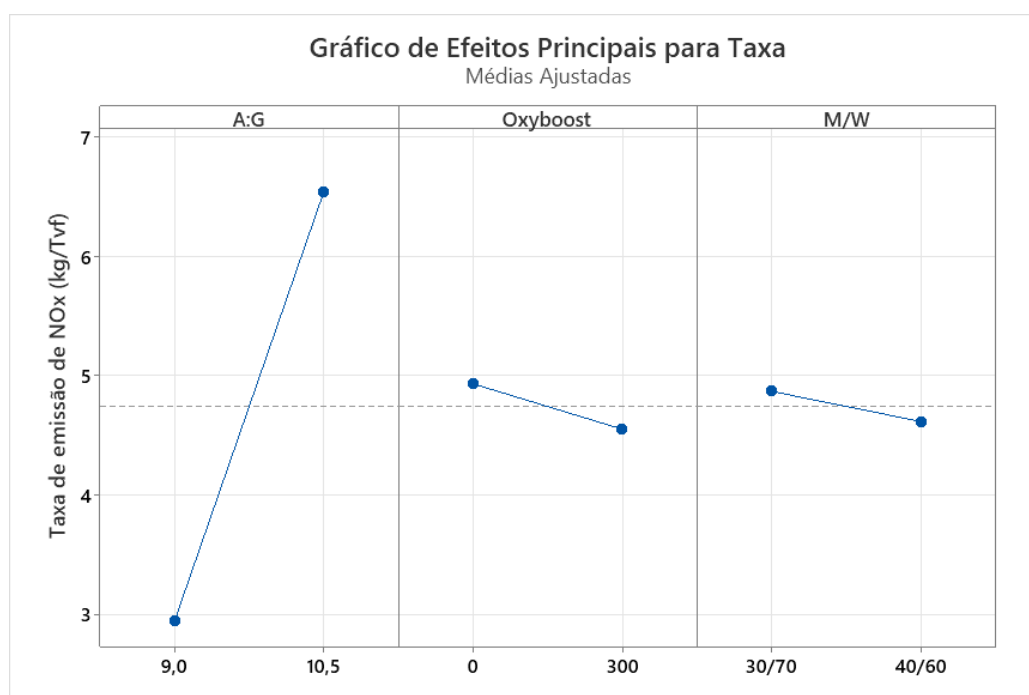
Tabela 3 - Efeito dos parâmetros na emissão de NOx

Termo	Efeito	VIF
A:G	3,5900	1,00
Oxyboost	-0,3800	1,00
M/W	-0,2540	1,00

Fonte: Autores

A ferramenta de otimização do software *Minitab*, indicou que a configuração ideal para a minimização das emissões seria: relação ar/gás de 9,0, vazão do Oxyboost em 300m³/h e relação MECA/WECA de 40/60, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Configuração ideal dos parâmetros no Minitab



Fonte: Autores

Substituindo os valores citados anteriormente na equação de regressão da Figura 9, é estimada uma taxa de emissão de NOx de 2,63 Kg/Tvf, conforme Equação 1, valor significativamente inferior ao limite estabelecido pela norma de 4,30 Kg/Tvf.

Equação 1 – Cálculo de taxa de emissão de NOx para os parâmetros otimizados

$$2,63 = -18,593 + (2,3933 \times 9,0) - (0,1900 \times 1) - (0,1270 \times 1)$$

No entanto, operar com uma relação ar/gás abaixo da condição estequiométrica ideal pode acarretar riscos significativos para a integridade do sistema, especialmente no que diz respeito à vida útil dos regeneradores. Combustões subestequiométricas favorecem a presença de compostos redutores que, em combinação com vapores alcalinos — como a soda proveniente do fundente —, promovem ataques químicos às superfícies refratárias. Esses efeitos foram estudados por Griffiths et al. (2005), os quais desenvolveram modelos e diagnósticos para avaliar a corrosão em altas temperaturas de materiais refratários utilizados em fornos de vidro operando com combustão do tipo oxy-fuel. Os autores demonstraram que vapores de NaOH e KOH, comuns no ambiente de combustão, penetram nos poros do refratário e reagem com os componentes da matriz cerâmica, formando fases líquidas e expansivas que comprometem a integridade estrutural do material. Esses efeitos se intensificam sob atmosferas redutoras, comuns em regimes subestequiométricos, acelerando significativamente o processo de degradação e aumentando o risco de falhas estruturais precoces nos regeneradores.

Diante dessa preocupação, foi proposto um ajuste mais conservador dos parâmetros, adotando uma relação ar/gás de 9,5, que embora ainda subestequiométrica, representa um risco significativamente menor de degradação dos regeneradores. Com essa configuração, a taxa de emissão estimada pela equação de regressão, considerando um índice de confiança de 95%, é entre 3,66 kg/Tvf e 3,99 kg/Tvf, ainda compatível com os limites da norma vigente, equilibrando os objetivos de redução de emissão com a preservação da infraestrutura do forno.

Para validar a eficácia do modelo estatístico construído e verificar a coerência do parâmetro proposto, foi contratada uma nova campanha de medição externa, no ponto conforme Figura 12. A coleta foi realizada com condições operacionais ajustadas conforme a recomendação do modelo. O resultado obtido foi de 3,93 Kg/Tvf, 8,6% abaixo do limite estabelecido pelo CONAMA, demonstrando elevada acurácia preditiva e validando o modelo construído como ferramenta confiável de suporte à decisão.

Figura 12 - Medição da equipe externa para validação do modelo



Fonte: Autores

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de conclusão de curso teve como finalidade principal o desenvolvimento de uma abordagem confiável para o monitoramento interno das emissões de óxidos de nitrogênio em uma indústria vidreira, bem como a proposição de melhorias operacionais baseadas na análise estatística de dados, conforme os princípios da metodologia DMAIC. A necessidade do estudo surgiu em virtude das dificuldades técnicas e operacionais relacionadas ao ponto de medição utilizado pela empresa externa certificadora, o qual, por estar localizado a uma altura superior a 20 metros, impunha limitações logísticas significativas à realização de medições frequentes e acompanhadas pela equipe técnica da planta.

A partir do mapeamento do processo de combustão e das características construtivas do forno industrial, foi possível estabelecer um novo ponto de coleta interno, acessível e seguro, permitindo a ampliação da frequência das medições e o monitoramento em tempo real. Para garantir a confiabilidade dos dados obtidos internamente, foi conduzida uma análise comparativa com medições simultâneas realizadas pela empresa externa, com resultados altamente convergentes, validando a metodologia adotada.

Além da adequação do processo de medição, o projeto avançou no desenvolvimento de um modelo estatístico de previsão da taxa de emissão de NO_x, fundamentado em dados coletados internamente. O modelo demonstrou elevado poder explicativo (R^2 de 99,04%) e baixa colinearidade entre variáveis (VIF de 1,0), sendo capaz de estimar com precisão as emissões com base em variáveis operacionais monitoradas rotineiramente.

Com o auxílio de um planejamento experimental (DOE), testaram-se diferentes configurações dos parâmetros operacionais — incluindo a relação ar/gás, o uso do queimador *Oxyboost* e a razão MECA/WECA — visando a identificação de uma condição ideal de operação que possibilitasse o atendimento aos limites de emissão estabelecidos por norma. A configuração ideal obtida por meio da ferramenta de otimização do software Minitab demonstrou-se tecnicamente viável para atingir os limites normativos, embora envolvesse um grau de operação sub-estequiométrica considerado arriscado para a durabilidade dos regeneradores.

Dessa forma, optou-se por propor um ajuste conservador dos parâmetros, ainda capaz de manter as emissões dentro dos limites legais, mas com menor risco de comprometimento estrutural do sistema de combustão. A efetividade desse novo

parâmetro foi validada por meio de uma campanha adicional de medição externa, cujos resultados confirmaram a precisão do modelo desenvolvido.

O projeto obteve sucesso em seus principais objetivos, foram alcançados:

- O desenvolvimento de uma metodologia interna confiável de medição;
- A criação e validação de um modelo preditivo para emissão de NOx;
- A proposição de uma estratégia operacional tecnicamente viável e ambientalmente conforme.

Durante a execução, destacou-se como desafio adicional a limitação da autonomia dos membros da equipe do projeto, o que exigiu a adoção de uma postura propositiva baseada em fundamentos técnicos e na literatura científica para garantir a continuidade das atividades. Esse aspecto reforça a importância de integrar conhecimento acadêmico e capacidade argumentativa nas práticas de gestão e melhoria de processos industriais.

O presente trabalho contribui de forma relevante para o setor produtivo, ao demonstrar que é possível aliar rigor estatístico, inovação operacional e viabilidade prática no enfrentamento de desafios ambientais, promovendo avanços em direção a uma produção industrial mais eficiente, segura e sustentável.

A aplicação da metodologia DMAIC demonstrou-se eficaz não apenas como ferramenta de diagnóstico, mas também como base metodológica para implantação de soluções robustas e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They Are Controlled. Washington, D.C., 1999.

DEFRA – DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD & RURAL AFFAIRS. Emissions of air pollutants in the UK – Nitrogen oxides (NO_x). Londres, 2024.

VERGNHANINI FILHO, R. Avaliação de tecnologias de controle de NO_x aplicadas à combustão em fornos industriais. Revista IPT Tecnologia e Inovação, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 1-20, 2016.

PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. A estratégia Seis Sigma: como a GE, a Motorola e outras empresas estão aperfeiçoando seu desempenho. Rio de Janeiro: Campus, 2001.

MINITAB. Interpretar os principais resultados para Teste de Normalidade. Minitab Support, 2024. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/normality-test/interpret-the-results/key-results/>. Acesso em: 26 maio 2025.

MINITAB. Interpretar todas as estatísticas e gráficos para Correlação. Minitab Support, 2024. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/>. Acesso em: 26 maio 2025

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

ESCUADERO, M. C. L.; LOPES, A. P. M. Aplicação da metodologia DMAIC para aumento de produtividade industrial. Colloquium Exactarum, v. 8, n. 4, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/318212901>. Acesso em: 25 maio 2025.

COHEN, J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2. ed. New York: Routledge, 1988.

HOGG, R. V.; TANIS, E. A. *Probability and statistical inference*. 9. ed. Boston: Pearson, 2015.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. *Basic econometrics*. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2009.

GRIFFITHS, S. K.; GUPTA, A.; WALSH, P. M.; RICE, S. F.; VELEZ, M.; ALLENDORF, M. D.; PECORARO, G. A.; NILSON, R. H.; WOLFE, H. E.; YANG, N. Y. C.; SPEAR, K. E.; GHANI, M. U. *Development of models and online diagnostic monitors of the high-temperature corrosion of refractories in oxy/fuel glass furnaces: final project report*. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2005.

APÊNDICE A – PROJECT CHARTER

Project Charter		
Nome do projeto: Desenvolvimento e validação de um modelo estatístico para controle de emissões de NOx em uma indústria vidreira		Saving (Projeção): NA
Líder: Gustavo Wagner		Vice-Líder: Lucas Adriano
Área: ME		Sponsor: Gerente industrial
Início: Agosto/2024		Fim: Julho/2025
Time do projeto	Função	Áreas atingidas
Gustavo Wagner	NA	Departamento de composição e fusão
Lucas Adriano	NA	Gestão do meio ambiente
Engenheiro do forno	Engenheiro	
Gerente do forno	Gerente	
Técnico Refratarista	Técnico	
Técnico de Produção	Técnico	
Definição do problema:		Objetivo do projeto
Emissões de NOx acima do limite estabelecido pela resolução 02000.000921/2002-78 do CONAMA após a realização de reparo a frio.		Garantir o controle das emissões de NOx (Abaixo de 4,30kg/tvf) em todas as cargas de operação. Estabelecer uma maneira de controle interno das emissões de NOx, utilizando as análises de gases internas e não externas.
Indicadores principais:		Indicadores secundários:
Emissão de NOx (kg/tvf)		Concentração de CO (ppm)
Concentração de Nox (ppm)		Concentração de O2 (%)
		Vazão (Nm ³ /h)
Escopo do projeto:		
O projeto seguirá a metodologia DMAIC.		

APÊNDICE B – MASTER PLAN

Trabalho de conclusão de curso

Início do projeto:

Semana de exibição:

TAREFA	PROGRESSO	INÍCIO	TÉRMINO	29-jul-2024							5-ago-2024							12-ago-2024							19-ago-2024							26-ago-2024							2-set-2024							9-set-2024							16-set-2024									
				s	t	q	q	s	s	d	s	t	q	q	s	s	d	s	t	q	q	s	s	d	s	t	q	q	s	s	d	s	t	q	q	s	s	d	s	t	q	q	s	s	d	s	t	q	q	s	s	d	s	t	q	q	s	s	d	s	t	q
1. Definir	100%	1/8/24	2/9/24	[Barra cinza]																																																										
1.1 Formar um time	100%	1/8/24	11/8/24	[Barra cinza]																																																										
1.2 Formar o project charter	100%	12/8/24	22/8/24	[Barra cinza]																																																										
1.3 Mapear o processo	100%	23/8/24	2/9/24	[Barra cinza]																																																										
2. Medir	100%	3/9/24	27/10/24	[Barra cinza]																																																										
2.1 Escutar as partes interessadas	100%	3/9/24	13/9/24	[Barra cinza]																																																										
2.2 Plano de coleta de dados	100%	14/9/24	24/9/24	[Barra cinza]																																																										
2.4 Coletar dados	100%	25/9/24	5/10/24	[Barra cinza]																																																										
2.5 Análise gráfica	100%	6/10/24	16/10/24	[Barra cinza]																																																										
2.6 Capabilidade do processo	100%	17/10/24	27/10/24	[Barra cinza]																																																										
3. Analisar	100%	28/10/24	10/12/24	[Barra cinza]																																																										
3.1 Problemas focados	100%	28/10/24	7/11/24	[Barra cinza]																																																										
3.2 Identificar as fontes de variação	100%	8/11/24	18/11/24	[Barra cinza]																																																										
3.3 Triagem as causas potenciais	100%	19/11/24	29/11/24	[Barra cinza]																																																										
3.4 Verificar as causas	100%	30/11/24	10/12/24	[Barra cinza]																																																										
4. Melhorar	100%	11/12/24	3/2/25	[Barra cinza]																																																										
4.1 Criar soluções	100%	11/12/24	21/12/24	[Barra cinza]																																																										
4.2 Selecionar soluções	100%	22/12/24	1/1/25	[Barra cinza]																																																										
4.3 Promover as soluções	100%	2/1/25	12/1/25	[Barra cinza]																																																										
4.4 Piloto da solução	100%	13/1/25	23/1/25	[Barra cinza]																																																										
4.5 Implementar a solução	100%	24/1/25	3/2/25	[Barra cinza]																																																										
5. Controlar e Transferir	80%	4/2/25	30/3/25	[Barra cinza]																																																										
5.1 Implementar a solução	100%	4/2/25	14/2/25	[Barra cinza]																																																										
5.2 Monitorar o processo	100%	15/2/25	25/2/25	[Barra cinza]																																																										
5.3 Provar a mudança de processo	100%	26/2/25	8/3/25	[Barra cinza]																																																										
5.4 Compartilhar o conhecimento adquirido	100%	9/3/25	19/3/25	[Barra cinza]																																																										
5.5 Manter as melhorias	0%	20/3/25	30/3/25	[Barra cinza]																																																										

Insira novas linhas ACIMA desta