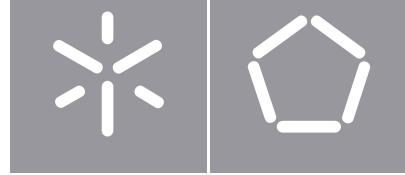


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Manuel Inácio da Costa Villaverde Machado Novais

**Controlo estatístico de processo através
de dados de máquinas e equipamentos**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Manuel Inácio da Costa Villaverde Machado Novais

**Controlo estatístico de processo através
de dados de máquinas e equipamentos**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Informática

Trabalho efetuado sob a orientação de
António Carlos Silva Abelha

Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositórioUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho:



CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Agradecimentos

A conclusão deste trabalho não seria possível sem o apoio e a colaboração de várias pessoas, às quais gostaria de expressar a minha mais profunda gratidão.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus amigos e colegas de curso, Duarte, Lucas, Pedro e Tiago, pelo apoio incondicional, pelas conversas motivadoras e pelas incontáveis horas de estudo em conjunto. A vossa amizade foi fundamental ao longo de todo o percurso académico.

Agradeço também ao meu orientador, Professor António Abelha, pela orientação, paciência e conselhos valiosos que me guiaram durante a realização deste trabalho. O seu conhecimento e dedicação foram essenciais para a conclusão deste projeto.

Por fim, um agradecimento especial ao meu orientador de estágio na Siemens, Daniel Marques, e a toda a equipa de OE, pelo acolhimento, profissionalismo e ajuda ao longo do estágio. A vossa colaboração e apoio foram imprescindíveis para o meu desenvolvimento profissional e para a realização deste trabalho.

A todos, o meu sincero obrigado.

Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, Braga, maio 2025

Manuel Inácio da Costa Villaverde Machado Novais

Resumo

Nos últimos anos, as energias renováveis emergiram como um ponto focal de atenção global, impulsionadas pela escalada das preocupações ambientais. O crescente reconhecimento dos impactos adversos associados a fontes de energia tradicionais, como os combustíveis fósseis, provocou uma mudança de paradigma no sentido de alternativas mais limpas e sustentáveis. As questões ambientais, incluindo as alterações climáticas, poluição atmosférica e o esgotamento dos recursos, catalisaram um esforço coletivo para a transição para soluções de energia renovável.

Com esse intuito, a procura por pás eólicas eficientes e fiáveis intensifica-se. Garantir a qualidade e a consistência da produção de pás eólicas é fundamental para o desempenho geral e a longevidade das turbinas eólicas. Este estudo visa preencher a lacuna entre as práticas tradicionais de Controlo estatístico de processo (SPC) e a integração de dados de máquinas para otimizar os processos de fabricação.

O objetivo trata-se de empregar uma análise abrangente de dados históricos de fabrico, com foco nos principais parâmetros e variáveis que influenciam a qualidade dos componentes das pás eólicas. Os dados da máquina, adquiridos por meio de sensores avançados e sistemas de monitorização, são utilizados para desenvolver uma estrutura SPC robusta, adaptada aos desafios únicos da produção de pás eólicas. A integração de dados de máquina permite uma monitorização em tempo real, deteção precoce de falhas e estratégias adaptativas de controle de processo.

No entanto, uma deteção precoce de falhas não é suficiente para a industria. Uma simples falha pode implicar uma perda nos milhares, pelo que é necessário utilizar outras métricas de SPC, como as *Nelson Rules* para prevenir falhas e custos desnecessários na produção.

Palavras-chave SPC, Nelson Rules, Sigma Rules, cartas de controlo, NAS

Abstract

In recent years, renewable energy has emerged as a focal point of global attention, driven by escalating environmental concerns. Growing recognition of the adverse impacts associated with traditional energy sources such as fossil fuels has sparked a paradigm shift towards cleaner, more sustainable alternatives. Environmental issues, including climate change, air pollution and resource depletion, have catalyzed a collective effort to transition to renewable energy solutions.

To this end, the search for efficient and reliable wind blades is intensifying. Ensuring the quality and consistency of wind blade production is critical to the overall performance and longevity of wind turbines. This study aims to bridge the gap between traditional Statistical Process Control (SPC) practices and the integration of machine data to optimize manufacturing processes.

The objective is to employ a comprehensive analysis of historical manufacturing data, focusing on the main parameters and variables that influence the quality of wind blade components. Machine data, acquired through advanced sensors and monitoring systems, is used to develop a robust SPC structure adapted to the unique challenges of wind blade production. Machine data integration enables real-time monitoring, early fault detection and adaptive process control strategies.

However, early detection of failures is not enough for the industry. A simple failure can result in a loss of thousands, which is why it is necessary to use other SPC metrics, such as the Nelson Rules to prevent failures and unnecessary costs in production.

Keywords SPC, Nelson Rules, Sigma Rules, control charts, NAS

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.1.1	Eficiência de custos	1
1.1.2	Competitividade	1
1.1.3	Escalonamento de operações	2
1.1.4	Impacto ambiental	2
1.1.5	Consistência e confiabilidade	2
1.2	Enquadramento	2
1.2.1	Otimização de Processos através de SPC	2
1.2.2	Garantia da Qualidade	3
1.2.3	Manutenção preditiva	3
1.2.4	Tomada de decisões em tempo real	3
1.3	Objetivo	3
2	Estado da arte	5
2.1	Fundamentos Teóricos do SPC	5
2.2	Limitações das <i>Sigma Rules</i>	6
2.3	Nelson Rules	6
2.4	Trabalho relacionado	10
2.5	Conclusão	11
3	O problema e os seus desafios	12
3.1	Seleção de Dados	12
3.2	Aquisição de Dados	12
3.3	Desenvolvimento da Aplicação SPC	13

4 Metodologias e ferramentas	14
4.1 Metodologia de Trabalho	14
4.1.1 Design Science Research (DSR)	14
4.1.2 Metodologia Ágil e Scrum	14
4.2 Ferramentas Utilizadas	15
4.2.1 Node-RED	15
4.2.2 Python	15
4.2.3 SQL Server	15
4.3 Conclusão	16
5 Contribuições	17
5.1 Contribuição Metodológica	17
5.2 Contribuição Técnica	17
5.3 Conclusão	18
6 Desenvolvimento do projeto	19
6.1 Introdução	19
6.2 Conetividade de máquina	20
6.2.1 Arquitetura da rede	21
6.2.2 Métodos de transmissão de dados	22
6.3 Criação e manutenção da Base de Dados	24
6.3.1 Porquê SQL?	24
6.3.2 Propósito de uma NAS em manutenção de Base de dados	25
6.3.3 Uso de <i>Container Manager</i>	26
6.3.4 Manutenção da base de dados	26
6.4 Levantamento de dados	27
6.4.1 Introdução ao Node-Red	27
6.4.2 Como funciona	27
6.4.3 Capacidades do Node-Red	28
6.5 Migração de dados	29
6.6 Desenvolvimento da aplicação	30
6.6.1 Estrutura do código	30
6.6.2 Estrutura da base de dados	32

6.6.3	Interface do usuário	34
6.6.4	Instalação da aplicação	39
6.7	Aplicações auxiliares	41
6.7.1	Specification limits Changer	41
6.7.2	SPC Web App	43
6.7.3	Resumo	44
6.8	Conclusão	45
7	Aplicação do projeto	47
7.1	Introdução	47
7.2	Reuniões semanais	48
7.3	Desenvolvimento e teste iterativos	49
7.4	Implementação e monitorização diária	50
7.5	Resultados obtidos	52
8	Conclusões e trabalho futuro	55
8.1	Conclusões	55
8.2	Perspetiva de trabalho futuro	57
9	Planeamento	60
9.1	Atividades	60

Lista de Figuras

1	Exemplo de <i>Three Sigma</i>	6
2	Exemplo de <i>Six Sigma</i>	6
3	Arquitetura de rede de um molde	22
4	Transmissão de dados máquina	23
5	Exemplo de um <i>flow</i> de dados no node-red.	28
6	Comunicação da aplicação - exemplo resumido	32
7	Database Schema para um processo	33
8	Interface da aplicação	34
9	Exemplo de um processo com vários sensores	36
10	Iteração com as <i>Nelson Rules</i>	37
11	Adicionar um comentário	38
12	Após adicionar comentários	39
13	Mudança de limites de especificação - exemplo	42
14	Página web SPC em macro	43
15	TV no chão de fábrica	51
16	Exemplo de deteção	53

Lista de Tabelas

1	Primeiras 4 <i>Nelson Rules</i>	8
2	Ultimas 4 <i>Nelson Rules</i>	9
3	Plano de atividades.	60

Capítulo 1

Introdução

Esta tese representa o trabalho desenvolvido durante o quinto ano de Mestrado em Engenharia Informática na Universidade do Minho durante o ano académico de 2023/2024.

O ano foi passado em estágio na Siemens Gamesa com o objetivo de desenvolver uma aplicação de controlo estatístico de processo (SPC), dando uso aos dados de maquina existentes durante o fabrico de pás eólicas.

1.1 Motivação

A Siemens Gamesa, como jogador chave na indústria da energia eólica, opera num contexto marcado pela crescente procura de soluções energéticas sustentáveis. No centro das operações da Siemens Gamesa está o processo de fabrico de pás eólicas. A otimização deste processo é de grande importância pelos seguintes motivos:

1.1.1 Eficiência de custos

A otimização do processo contribui para um aumento na eficiência de custos, simplificando as operações, reduzindo o tempo de produção e minimizando o desperdício de recursos. Um processo mais eficiente traduz-se em custos de produção mais baixos, melhorando a viabilidade económica das soluções de energia eólica.

1.1.2 Competitividade

Num mercado de rápido desenvolvimento, manter uma vantagem competitiva é essencial. Um processo de fabrico otimizado permite que a Siemens Gamesa produza pás eólicas de alta qualidade a um custo competitivo, posicionando a empresa favoravelmente no mercado global de energia eólica.

1.1.3 Escalonamento de operações

A otimização abre caminhos para a integração de tecnologias e práticas inovadoras no processo de fabrico. Isto não só melhora a qualidade e o desempenho das pás eólicas, mas também reforça a reputação da Siemens Gamesa como líder tecnológico na indústria.

1.1.4 Impacto ambiental

Processos de fabrico eficientes geralmente estão correlacionados com a redução do impacto ambiental. A otimização permite que a Siemens Gamesa implemente práticas sustentáveis, como métodos de produção com eficiência energética e o uso de materiais ecológicos, alinhando-se às metas ambientais globais e aos requisitos regulatórios.

1.1.5 Consistência e confiabilidade

Um processo otimizado garante a consistência e a confiabilidade da produção de pás eólicas. Isto é crucial para atender aos padrões da indústria, às expectativas dos clientes e garantir o desempenho a longo prazo das turbinas eólicas da Siemens Gamesa.

1.2 Enquadramento

A Siemens Gamesa, em sua procura por excelência, acumula uma quantidade substancial de dados gerados por máquinas e equipamentos durante todo o processo de fabrico das pás eólicas. A utilização destes dados surge como uma faceta crítica para melhorar a eficiência operacional, garantir o controlo de qualidade e impulsionar a empresa rumo à liderança do setor.

1.2.1 Otimização de Processos através de SPC

A riqueza de dados de máquinas e equipamentos armazenados oferece uma oportunidade para implementar Controlo Estatístico de Processo (SPC). Ao aplicar métodos estatísticos para analisar e interpretar esses dados, a Siemens Gamesa pode obter *insights* sobre a variabilidade no processo. SPC permite a identificação de tendências, padrões e anomalias, permitindo a tomada de medidas proativas para manter e melhorar a estabilidade do processo.

1.2.2 Garantia da Qualidade

O fabrico orientado por dados facilita uma estrutura robusta de garantia de qualidade. A monitorização contínua dos principais parâmetros por meio de SPC garante que o processo siga os padrões de qualidade predefinidos consistentemente. Esta abordagem proativa mitiga o risco de defeitos, reduz o desperdício e, em última análise, leva à produção de pás eólicas de maior qualidade.

1.2.3 Manutenção preditiva

Os dados das máquinas podem ser aproveitados para manutenção preditiva, onde possíveis falhas de equipamentos ou problemas de desempenho são antecipados antes que ocorram. Isto não só minimiza o tempo de inatividade, mas também contribui para a longevidade e a confiabilidade dos equipamentos, garantindo um processo de produção contínuo.

1.2.4 Tomada de decisões em tempo real

O acesso a dados em tempo real permite que a Siemens Gamesa tome decisões informadas e oportunas. Seja a ajustar parâmetros na linha de produção ou responder a eventos inesperados, a capacidade de analisar dados em tempo real permite que a empresa otimize as operações e mantenha um ambiente de produção ágil.

1.3 Objetivo

Dado o papel fundamental do processo de fabrico na formação da competitividade, viabilidade económica e gestão ambiental da Siemens Gamesa, esta tese visa explorar estratégias e tecnologias para otimizar o processo, através de controlo estatístico de processo.

A implementação das cartas de controlo SPC e dos algoritmos baseados nas regras "Nelson Rules" não só garantirá a monitorização em tempo real do processo, mas também a identificação rápida de desvios e ações corretivas. Algo crucial para a minimização de falhas e defeitos.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma aplicação de controlo estatístico de processo (SPC) que integre dados de máquina em tempo real para otimizar o fabrico de pás eólicas. A investigação será orientada pelas seguintes questões:

1. Como a integração de dados de máquina pode permitir a deteção precoce de falhas?

2. De que forma a implementação de regras como as Sigma Rules e Nelson Rules pode detetar falhas e custos desnecessários no processo de produção?
3. Quais os impactos da aplicação de metodologias de controlo de processo na qualidade e consistência das pás eólicas?

Através destas questões, o estudo pretende não só monitorizar o processo de fabrico em tempo real, mas também prever falhas antes que elas ocorram, minimizando custos e aumentando a eficiência.

Capítulo 2

Estado da arte

As métricas de controlo estatístico de processo (SPC) foram introduzidas pela primeira vez em 1928 ([1]). Comissionado pela *Bell Laboratories* para melhorar a qualidade dos telefones fabricados, Walter Shewhart desenvolveu um método gráfico simples – o primeiro de uma gama crescente de gráficos SPC.

Compreender as causas da variação dentro de um processo industrial mostrou-se indispensável, pois ações poderiam ser tomadas para melhorar o processo e os resultados. Na década de 1950, com o uso efetivo de SPC, Deming converteu o Japão do pós-guerra no líder mundial em excelência industrial [2].

A filosofia por trás do conceito SPC é que o resultado de um processo pode ser trazido para um estado de controlo estatístico por meio de intervenção de gestão e engenharia ([3]). [4] afirma que o ponto forte do SPC reside na sua capacidade de monitorizar tanto o centro de processo como a variação sobre esse centro. Isso pode ser feito ao minerar dados de amostras em vários pontos dentro do processo; variações durante o processo que podem afetar a qualidade do produto final podem ser detetadas e corrigidas. Pelo que, SPC será capaz de reduzir a probabilidade de entregar um produto defeituoso para os clientes. SPC tem uma vantagem distinta sobre outras técnicas de controlo de qualidade, como inspeção final, que utiliza recursos humanos para detetar e corrigir problemas no final do ciclo de produção. SPC enfatiza em deteção e prevenção de problemas precoce. Em outras palavras, o SPC visa a continuamente melhorar o processo de fabrico para o produto alcançar alta satisfação dos clientes ([5]).

2.1 Fundamentos Teóricos do SPC

O SPC é fundamentado em princípios estatísticos essenciais para monitorizar a variabilidade dos processos e identificar desvios. Conceitos-chave, como gráficos de controlo, capacidade do processo, causas comuns e causas especiais de variação, são discutidos em detalhe. A obra seminal [6], é um ponto de partida histórico para entender os fundamentos do SPC.

Atualmente existem várias regras dentro de SPC, no entanto, as mais proeminentes são as *six sigma*

e *three sigma*, regras que dão uso a estatística nos dados para alcançar controlos de limite. A principal diferença entre *six sigma* e *three sigma* é a quantidade de valores fora de controlo permitidos.

Tanto no *six sigma* como no *three sigma* os controlos de limites são calculados com base na média e desvio de padrão, a diferença agora, é onde os controlos de limite existem. Para o *three sigma* os limites são entre três *standard deviation* da média, o que, num estado de controlo, permite uma taxa de valores fora do controlo de .3%, já os *six sigma* tem os controlos de limite a seis *standard deviation* da média, o que apenas permite uma taxa de valores fora de controlo substancialmente mais pequena.

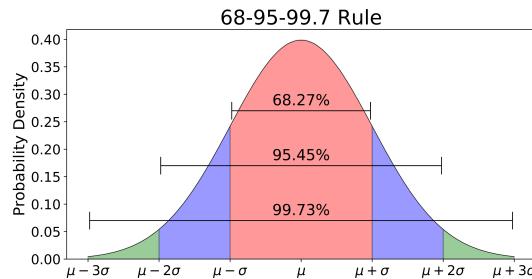


Figura 1: Exemplo de *Three Sigma*

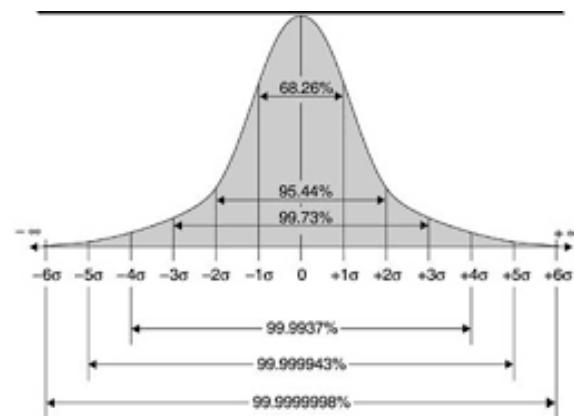


Figura 2: Exemplo de *Six Sigma*

Quando se pretende utilizar cartas de controlo SPC é importante escolher uma das regras que melhor se enquadram para o problema.

2.2 Limitações das Sigma Rules

Como dito anteriormente utilizar cartas de controlo SPC com base nas *Sigma Rules* (*six sigma*, *three sigma*, entre outras) é uma estratégia bastante comum quando falamos sobre uso de SPC, esta métricas brilham a descobrir variações no processo, no entanto, falham a preveni-las. Na industria de fabrico, e principalmente na de pás eólicas, uma falha durante o processo pode implicar custos nos milhares, pelo que é importante complementar estas métricas de deteção de falhas com outras de prevenção.

2.3 Nelson Rules

A fundação das *Nelson Rules* no Controlo Estatístico de Processo (SPC) tem origem no trabalho de Dr. Robert L. Nelson, estatístico pioneiro e especialista em gestão da qualidade. No início da década de 1980, Nelson reconheceu a necessidade de uma abordagem padronizada para identificar e abordar causas

especiais de variação nos processos industriais. O resultado de seus esforços foi o estabelecimento das *Nelson Rules*, um conjunto de regras de decisão destinadas a detetar padrões indicativos de variações não aleatórias em cartas de controlo antes que estes saiam dos limites de controlo.

O desenvolvimento das *Nelson Rules* foi motivado pela complexidade inerente aos processos industriais e pela necessidade de uma metodologia sistemática para distinguir entre causas comuns e variações de causas especiais. As causas comuns, inerentes ao processo, levam a flutuações aleatórias dentro dos limites esperados, enquanto as causas especiais resultam em padrões ou tendências distintas, sinalizando uma anomalia que requer investigação.

Dr. Nelson pretendia criar um conjunto de regras que pudessem ser aplicadas universalmente a diferentes tipos de cartas de controlo, fornecendo uma forma padronizada de identificar pontos de preocupação num processo. As regras foram projetadas para serem intuitivas, práticas e aplicáveis em vários setores, tornando-as uma ferramenta valiosa para a gestão da qualidade.

O livro de [7], serviu como um guia para o desenvolvimento e aplicação das *Nelson Rules*. Este trabalho seminal forneceu *insights* aprofundados sobre os princípios por trás de cada regra, seu contexto histórico e aplicações práticas em diversos setores. Desde então, o livro tornou-se uma referência fundamental para profissionais de gestão da qualidade que procuram uma compreensão mais profunda do controlo estatístico de processo e do papel das *Nelson Rules*.

As *Nelson Rules* consistem em oito regras, cada uma abordando um padrão ou tendência específica em cartas de controlo. Estas regras definem limites para o intervalo aceitável de variação e, quando violadas, indicam a presença de uma causa especial, solicitando investigações adicionais e ações corretivas.

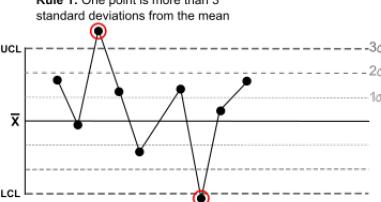
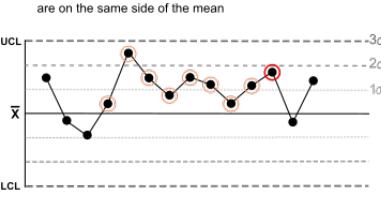
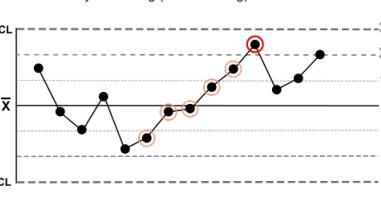
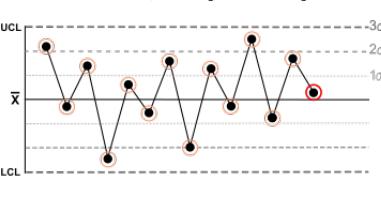
Regra	Descrição	Exemplo	Problema indicado
Regra 1	Um ponto está a mais de três <i>standard deviation</i> da média.	<p>Rule 1: One point is more than 3 standard deviations from the mean</p> 	Uma amostra (duas neste exemplo) está grosseiramente fora de controlo.
Regra 2	Nove ou mais pontos consecutivos estão no mesmo lado da média	<p>Rule 2: Nine (or more) points in a row are on the same side of the mean</p> 	Existe alguma tendência prolongada.
Regra 3	Seis ou mais pontos consecutivos estão continuamente a aumentar ou diminuir.	<p>Rule 3: Six (or more) points in a row are continually increasing (or decreasing)</p> 	Existe uma tendência.
Regra 4	Catorze ou mais pontos consecutivos alterão em direção, a aumentar e a diminuir.	<p>Rule 4: Fourteen (or more) points in a row alternate in direction, increasing then decreasing</p> 	Demasiada oscilação vai para além de ruído.

Tabela 1: Primeiras 4 Nelson Rules

Regra	Descrição	Exemplo	Problema indicado
Regra 5	Dois (ou três) de três pontos consecutivos estão a mais de dois <i>standard deviation</i> da média, na mesma direção.	<p>Rule 5: Two (or three) out of three points in a row are more than 2 standard deviations from the mean in the same direction</p>	Há uma tendência média das amostras estarem medianamente fora de controlo.
Regra 6	Quatro (ou cinco) de cinco pontos consecutivos estão a mais de um <i>standard deviation</i> da média na mesma direção.	<p>Rule 6: Four (or five) out of five points in a row are more than 1 standard deviation from the mean in the same direction</p>	Há uma forte tendência de as amostras ficarem ligeiramente fora de controlo.
Regra 7	Quinze pontos consecutivos estão todos dentro de um <i>standard deviation</i> da média em ambos os lados da média.	<p>Rule 7: Fifteen points in a row are all within 1 standard deviation of the mean on either side of the mean</p>	Com um <i>standard deviation</i> , seria esperada uma variação maior.
Regra 8	Existem oito pontos consecutivos, mas nenhum dentro de um <i>standard deviation</i> da média, e os pontos estão em ambas as direções da média.	<p>Rule 8: Eight points in a row exist with none within 1 standard deviation of the mean and the points are in both directions from the mean</p>	Saltar de cima para baixo e perder a primeira faixa de <i>standard deviation</i> é raramente aleatório.

Tabela 2: Ultimas 4 *Nelson Rules*

Estas regras tornaram-se um método eficaz e padronizado para detetar causas especiais de variação. À medida que as organizações continuam a enfatizar a gestão da qualidade, a implementação das Regras de Nelson continuam a ser uma prática fundamental na manutenção de controlo de processos e na garantia de qualidade consistente de produtos ou serviços.

2.4 Trabalho relacionado

O Controlo Estatístico de Processo, originalmente desenvolvido pela Bell Laboratories ([1]), surgiu com o objetivo de aprimorar o fabrico de telefones. Ao longo do tempo, essa ferramenta ganhou grande popularidade na indústria, sendo amplamente adotada por empresas como a Toyota no setor automotivo [8], assim como a Intel [9] nas suas *smart factories*. Embora cada empresa mantenha métricas específicas para o controlo estatístico dos seus processos, essa informação geralmente não é compartilhada devido a questões de concorrência. No entanto, o SPC continua a ser uma ferramenta amplamente procurada para garantir a qualidade em diversos tipos de processos industriais.

No documento técnico da Bosch, descrito em *Statistical Process Control – Quality Management in the Bosch Group* ([10]), são detalhados métodos robustos para o uso de ferramentas de software como **Solara®**, **qs-STAT®**, **procella®** e **0-QIS®**. Estes sistemas são responsáveis por calcular índices de capacidade e operar gráficos de controlo conforme a estratégia de avaliação da Bosch, seguindo os padrões exigidos internamente.

A Bosch também faz uso do **AQDEF** (*Advanced Quality Data Exchange Format*), um formato de troca de dados que padroniza a coleta e o intercâmbio de informações de qualidade automotiva entre sistemas. As ferramentas integradas permitem o acompanhamento contínuo e a reação imediata a desvios identificados por meio de gráficos de controlo baseados em regras similares às Sigma Rules, promovendo deteção de anomalias e permitindo ações corretivas rápidas.

A utilização dessas ferramentas e metodologias permite à Bosch monitorizar os seus processos de produção com grande precisão, promovendo uma melhoria contínua da qualidade e a eficiência operacional. Ao identificar e reagir rapidamente a desvios no processo, a Bosch optimiza a estabilidade do processo e garante que os produtos atendam aos mais altos padrões de qualidade.

A análise das práticas da Bosch demonstra o valor do Controlo Estatístico de Processo (SPC) na otimização contínua dos processos industriais. A integração de ferramentas específicas e a aplicação de metodologias permitiram à Bosch monitorizar a qualidade em tempo real e implementar ações corretivas antes que os desvios afetem os produtos finais. Embora os resultados específicos não sejam discutidos, o

sucesso da Bosch em utilizar essas ferramentas ressalta a importância do SPC para garantir estabilidade e eficiência. Pretende-se aproveitar este estudo e as práticas adotadas pela Bosch como base para o desenvolvimento deste projeto de SPC , adaptando as ferramentas e metodologias, assim como o uso de outras (por exemplo *Nelson Rules*) para melhorar a estabilidade e a qualidade dos processos no contexto da realidade na Siemens.

2.5 Conclusão

Em suma, a integração das cartas de controlo com as *Sigma Rules*, complementadas pelas *Nelson Rules*, constitui uma abordagem robusta e proativa para manter a estabilidade do processo e o controlo de qualidade. Ao incorporar métodos estatísticos e estruturas de controlos de limite, as organizações podem monitorizar com eficácia as variações durante o processo e identificar possíveis problemas antes estejam fora de controlo.

As *Sigma Rules* fornecem uma forma sistemática de interpretar a variabilidade dentro do processo, estabelecendo controlos de limite baseados em desvios padrão. Isso permite uma avaliação rápida e intuitiva se o processo está sob controle ou se apresenta flutuações incomuns. A adição das *Nelson Rules* melhora as capacidades de deteção, oferecendo um conjunto mais abrangente de diretrizes para identificar padrões ou tendências específicas que possam indicar uma mudança ou tendência no processo.

A implementação de cartas de controlo com essas regras combinadas não apenas ajuda a evitar que os dados excedam os controlos de limite, mas também promove uma cultura de melhoria contínua dentro da organização. A deteção precoce de anomalias permite ações corretivas e oportunas, evitando a produção de produtos ou serviços defeituosos. Isto, por sua vez, contribui para o aumento da eficiência, redução do desperdício e economia geral de custos.

Além disso, a integração destas metodologias promove decisões baseadas em dados, proporcionando às organizações com uma compreensão clara da variabilidade inerente aos seus processos. Ao promover uma abordagem proativa à gestão da qualidade, as empresas podem aumentar a sua competitividade global e a satisfação do cliente.

Em essência, esta implementação serve como uma ferramenta poderosa para garantir a estabilidade dos processos, melhorar a qualidade dos produtos ou serviços e impulsionar iniciativas de melhoria contínua nas organizações. Esta abordagem abrangente não só protege contra desvios, mas também capacita as empresas a enfrentar proativamente os desafios e a otimizar as suas operações para o sucesso a longo prazo.

Capítulo 3

O problema e os seus desafios

O objetivo do projeto é desenvolver uma aplicação com a capacidade de aceder diretamente aos dados das máquinas, e incorporar métricas de controlo de processo, como as *Sigma Rules* e as *Nelson Rules*, de forma a prevenir desvios no processo antes que estes ultrapassem os limites de controlo.

Os desafios deste projeto foram divididos e estão detalhados a seguir.

3.1 Seleção de Dados

O ponto inicial envolve a escolha dos dados que serão utilizados na aplicação. Atualmente, a Siemens Gamesa acumula vastas quantidades de dados, alguns dos quais são de grande utilidade, enquanto outros têm uma relevância limitada. Portanto, é crucial identificar e selecionar cuidadosamente os dados mais pertinentes para aplicar SPC de maneira eficaz.

Com esse intuito, foi conduzida uma colaboração com os responsáveis pelas diversas fases de fabrico. A intenção foi criar uma lista abrangente de dados que seriam considerados relevantes para a implementação do Controlo Estatístico de Processo. Essa abordagem visa garantir que apenas os dados essenciais e significativos sejam incorporados no Sistema SPC, otimizando assim a eficácia do processo de monitorização e controlo.

3.2 Aquisição de Dados

Uma vez selecionados os dados pertinentes, o próximo passo é adquiri-los. Felizmente, a Siemens já armazena esses dados numa base de Dados *Time Series*. No entanto, é necessário realizar a migração desses dados para SQL, proporcionando assim uma estrutura mais eficiente para o seu manuseio e análise.

Além disso, é crucial implementar um mecanismo para a coleta contínua de dados em tempo real,

alimentando assim a nova base de dados SQL. Esse processo garante a atualização constante das informações, permitindo uma aplicação eficaz do Controlo Estatístico de Processo e a deteção oportuna de quaisquer desvios no processo de fabricação.

3.3 Desenvolvimento da Aplicação SPC

A fase final envolve o desenvolvimento da aplicação de Controlo Estatístico de Processo (SPC). Esta aplicação deve ser concebida com uma interface visual atraente e de fácil interpretação. A sua acessibilidade é crucial, garantindo que mesmo aqueles sem formação específica em SPC possam compreender facilmente o estado do processo e identificar a necessidade de intervenção.

O objetivo é criar uma aplicação que proporcione uma representação visual clara dos dados, utilizando gráficos e ferramentas de visualização eficazes. Isso permitirá uma rápida avaliação do status do processo, facilitando a deteção de quaisquer desvios significativos. Além disso, a aplicação deve ser projetada de maneira intuitiva, tornando a interpretação dos resultados acessível a um público mais amplo dentro da organização.

Ao concluir essa etapa, a aplicação estará pronta para fornecer uma abordagem eficiente e acessível ao Controlo Estatístico de Processo, contribuindo assim para aprimorar a qualidade e eficiência dos processos de fabrico na Siemens Gamesa.

Capítulo 4

Metodologias e ferramentas

Este capítulo descreve as metodologias e ferramentas utilizadas ao longo do desenvolvimento do projeto. A escolha e aplicação dessas metodologias foram fundamentais para garantir uma abordagem estruturada e eficiente na criação da solução de Controlo Estatístico de Processo (SPC). Além disso, as ferramentas selecionadas foram cuidadosamente avaliadas e adotadas para assegurar que os dados de produção fossem integrados, processados e analisados de forma eficaz, resultando em uma aplicação robusta e adaptada às necessidades da Siemens Gamesa.

4.1 Metodologia de Trabalho

Este trabalho segue duas metodologias principais para a realização do projeto:

4.1.1 Design Science Research (DSR)

A metodologia **Design Science Research (DSR)** [11] foi utilizada como guia no desenvolvimento da aplicação SPC, abordando a criação, implementação e validação do artefacto. O DSR segue um ciclo estruturado que envolve a identificação do problema, a construção do artefacto (a aplicação SPC), sua implementação no ambiente real e a subsequente avaliação dos resultados.

Cada fase deste ciclo proporcionou *feedback* valioso, permitindo ajustes no design da aplicação para garantir que os objetivos de controlo estatístico fossem alcançados.

4.1.2 Metodologia Ágil e Scrum

Para a gestão do desenvolvimento do projeto, foi utilizada uma abordagem **Ágil**, com base no *framework* **Scrum** [12]. O desenvolvimento da aplicação foi dividido em ciclos curtos de iterações, chamados de *sprints*, com revisões semanais para discutir os avanços e ajustar o plano de ação. Através deste pro-

cesso, foi possível integrar *feedback* contínuo, aprimorando progressivamente a aplicação e garantindo sua adequação às necessidades reais de monitorização da fábrica.

4.2 Ferramentas Utilizadas

Para o desenvolvimento deste projeto, foram escolhidas ferramentas que facilitam tanto a coleta de dados quanto o processamento e visualização dos mesmos em tempo real. As ferramentas foram selecionadas com base em critérios de robustez, escalabilidade e flexibilidade, conforme descrito a seguir:

4.2.1 Node-RED

O **Node-RED** [13] foi escolhido como a ferramenta de levantamento de dados devido à sua versatilidade e simplicidade de uso em fluxos de trabalho de integração de dados. A capacidade de se conectar diretamente aos dispositivos de produção e coletar dados em tempo real tornou o **Node-RED** uma escolha ideal para o projeto. Além disso, a interface visual facilitou a criação de fluxos de dados complexos sem a necessidade de programação extensiva.

4.2.2 Python

A escolha do **Python** [14] foi baseada na sua flexibilidade e no vasto ecossistema de bibliotecas que suporta. Ferramentas como **pandas** [15] para manipulação de dados e **pyodbc** para integração com a base de dados SQL foram fundamentais no desenvolvimento da aplicação SPC. **Python** permite uma análise eficiente dos dados e a criação de cartas de controlo customizadas, facilitando a deteção de falhas e a análise estatística do processo de fabrico.

4.2.3 SQL Server

Para o armazenamento de dados, foi utilizada uma base de dados **SQL Server**, que oferece robustez e alta performance no processamento de grandes volumes de dados industriais. **SQL** [16] foi escolhido pela sua capacidade de realizar consultas complexas e fornecer resultados rápidos, permitindo uma análise em tempo real dos dados coletados. Além disso, o suporte a transações seguras e a consistência dos dados tornaram-no uma solução confiável para este projeto.

A escolha dessas ferramentas foi guiada pela necessidade de integrar soluções capazes de lidar com

dados industriais em tempo real e fornecer uma interface amigável para monitorização e controle de qualidade. Na secção de cada ferramenta mais abaixo está mais aprofundado a descrição do seu uso e razões para o mesmo.

4.3 Conclusão

A adoção de metodologias como o Design Science Research e o framework Ágil Scrum, juntamente com o uso de ferramentas tecnológicas como Node-RED, Python e SQL Server, foi essencial para o sucesso deste projeto. Essas abordagens proporcionaram um processo de desenvolvimento estruturado, permitindo a adaptação contínua da solução às necessidades reais do ambiente de produção industrial. As ferramentas escolhidas garantiram a integração eficiente de dados de máquina em tempo real, fornecendo uma plataforma robusta para a análise e controle estatístico de processos.

Ao combinar estas metodologias e tecnologias, foi possível desenvolver uma solução que não apenas otimiza a deteção de falhas e garante a qualidade dos produtos, mas também contribui para a melhoria contínua do processo de fabrico. Desta forma, o projeto alcançou seus objetivos, proporcionando uma base sólida para futuras implementações e aperfeiçoamentos.

Capítulo 5

Contribuições

A principal contribuição desta dissertação está no desenvolvimento de uma aplicação de Controlo Estatístico de Processo (SPC), adaptada para o ambiente de fabrico de pás eólicas. Esta aplicação permite a monitorização em tempo real de dados de máquina, facilitando a deteção precoce de falhas e promovendo melhorias contínuas na qualidade do processo. A integração de tecnologias avançadas proporcionaram uma solução que responde às necessidades da indústria de energias renováveis, especialmente no que diz respeito à eficiência e consistência da produção.

5.1 Contribuição Metodológica

O desenvolvimento desta aplicação foi guiado por metodologias que asseguraram uma execução estruturada e adaptável ao longo do projeto [4.1]. As abordagens adotadas possibilitaram um ciclo contínuo de refinamento e validação, garantindo que a solução proposta fosse prática e eficaz no contexto industrial.

5.2 Contribuição Técnica

A dissertação também oferece uma contribuição técnica ao utilizar um conjunto de ferramentas modernas que possibilitaram a criação de um sistema robusto para o controlo de qualidade em tempo real [4.2]. A combinação das mesmas resultou numa arquitetura flexível e escalável, capaz de integrar os dados de diversas máquinas da fábrica. Esta contribuição técnica facilita a monitorização contínua do processo e a análise de grandes volumes de dados, proporcionando à fábrica uma ferramenta eficiente para a tomada de decisões em tempo real.

5.3 Conclusão

Em suma, o trabalho apresentado traz uma contribuição relevante ao aliar tecnologias modernas de monitorização em tempo real com práticas avançadas de controlo de processo. A solução desenvolvida oferece um sistema robusto para o controlo de qualidade na produção de pás eólicas, proporcionando melhorias contínuas e maior eficiência na operação.

Capítulo 6

Desenvolvimento do projeto

6.1 Introdução

Este capítulo analisa o processo de desenvolvimento do sistema SPC, destacando seis aspectos principais que garantem uma implementação robusta e eficaz.

- Conetividade de máquina**

Estabelecer uma conectividade confiável de máquina é uma etapa fundamental em qualquer processo de fabrico orientado por dados. A Siemens já forneceu a infraestrutura de conectividade essencial, permitindo a integração perfeita de diversas máquinas e sensores na linha de produção. Esta conectividade é crucial, pois facilita a recolha contínua e precisa de dados de múltiplas fontes, garantindo que as etapas subsequentes do processo de SPC se baseiam em informações precisas e em tempo real.

- Criação e manutenção da Base de Dados**

Para dar suporte às necessidades de levantamento e armazenamento de dados do sistema SPC, uma base de dados SQL foi estabelecido num dispositivo *Network-Attached Storage* (NAS). Essa configuração garante que a base de dados seja acessível, segura e escalável, fornecendo um repositório confiável para os grandes volumes de dados gerados pelos processos de fabrico..

- Levantamento de dados**

O levantamento de dados é feito através do Node-RED, uma ferramenta versátil de desenvolvimento baseada em fluxo. Inicialmente, os dados foram levantados com uma abordagem *Extract, Load, and Transform* (ELT) para lidar com dados *Time Series*, com Grafana servindo como plataforma para visualização de dados. No entanto, para melhor atender às necessidades do SPC, haverá uma transição para um processo de *Extract, Transform, and Load* (ETL) direcionado a uma base

de dados SQL. Essa mudança permite um uso mais direto dos dados sem manipulação extensiva, mantendo a base de dados mais simplificada e eficiente, otimizada para os requisitos do SPC.

- **Migração de dados**

Uma vez que um controlo estatístico de processo necessita de um histórico de dados para um uso mais eficaz foi decidido utilizar os dados do último ano (2023) para ter uma melhor ideia da evolução do processo de fabrico. Como os dados são armazenados numa base de dados *Time Series* é necessário fazer uma migração dos mesmos para a base de dados SQL. Foi usado Python para transferir os dados com eficiência entre diferentes sistemas de armazenamento devido aos seus recursos de manipulação de dados e *scripts*, assim como suporte a bibliotecas de conectividade a diferentes bases de dados. Essa migração garante que os dados históricos sejam preservados e possam ser aproveitados para análises contínuas de SPC, proporcionando continuidade e profundidade a *insights*.

- **Desenvolvimento da aplicação**

A aplicação principal SPC foi desenvolvida em **Python**, tirando proveito de bibliotecas e ferramentas para análise estatística e controlo de processo. A flexibilidade do **Python** e o amplo suporte da comunidade tornam esta linguagem na escolha ideal para desenvolver uma aplicação que possa lidar com análises complexas de dados, gerar cartas de controlo e fornecer *insights* adicionais. Esta aplicação é o core do sistema SPC, permitindo controlo de qualidade pro-ativo e otimização de processo.

- **Desenvolvimento de aplicações secundárias**

Para melhorar a funcionalidade e a usabilidade da aplicação SPC, também foram desenvolvidas várias aplicações de suporte. Estas ferramentas auxiliares são projetadas para atender necessidades específicas e melhorar a experiência geral do usuário, garantindo que o sistema SPC não seja apenas poderoso, mas também fácil de usar e adaptável a vários requisitos operacionais. Essas aplicações secundárias fornecem recursos e capacidades adicionais que suportam a aplicação principal, tornando todo o sistema mais robusto e eficiente.

6.2 Conetividade de máquina

Este capítulo, serve para aprofundar o design de rede implementado nas instalações da Siemens Gamesa em Vagos, focando na forma como a empresa gere e protege a conectividade das suas máquinas. A dis-

cussão abrangerá os vários segmentos de rede dedicados a diferentes tipos de dispositivos e os principais métodos através dos quais estas máquinas transmitem os seus dados para a base de dados central. Essa abordagem não só aumenta a eficiência operacional, mas também garante uma segurança robusta em todo o sistema.

6.2.1 Arquitetura da rede

A Siemens Gamesa aproveita um projeto de rede robusto e intrincado para garantir uma conectividade de máquina eficiente e segura. Este design emprega várias redes adaptadas a tipos específicos de dispositivos, cada um servindo funções distintas e fornecendo segurança aprimorada. Ao compartimentar a infraestrutura de rede, a Siemens Gamesa pode gerir e proteger melhor o fluxo de dados dentro de seus sistemas.

A arquitetura de rede é segmentada em várias redes discretas, cada uma dedicada a uma categoria particular de dispositivos. Esta segmentação é crucial para manter elevados níveis de segurança e eficiência operacional. As redes primárias incluem:

- **Operational Technology (OT):** Esta rede é dedicada aos dispositivos diretamente envolvidos na produção e operação. Inclui controladores, sensores e atuadores que são essenciais para monitorização e controlo em tempo real. A rede OT é altamente segura para evitar acesso não autorizado e possíveis interrupções no processo de fabrico.
- **Use Your Own Device (UYOD):** Esta rede acomoda os dispositivos privados dos funcionários. Permite que os colaboradores conectem seus dispositivos pessoais num ambiente controlado e seguro, garantindo que o uso pessoal não comprometa a segurança e a eficiência das redes operacionais e corporativas.
- **Guest (Guest):** Esta rede foi concebida para visitantes e hóspedes que necessitam de acesso temporário à Internet. É isolada das principais redes operacionais e corporativas para evitar acesso não autorizado e possíveis ameaças à segurança.
- **Corporate (Corp):** Esta rede suporta os computadores de trabalho dos funcionários e inclui apenas dispositivos geridos pelo departamento de IT. Lida com operações de negócios diárias e tarefas administrativas, garantindo que dados críticos do negócios sejam transmitidos e armazenados com segurança.
- **Scanguns (Scanguns):** Esta rede é especificamente para leitores QR conectados ao sistema

SAP. Garante que os dados das operações de digitalização sejam transmitidos de forma segura e eficiente para a base de dados SAP, facilitando o inventário preciso e oportuno e a gerência operacional.

O design da rede **OT** deve incluir a atribuição de IP's estáticos para facilitar a comunicação entre os dispositivos, permitindo que se conectem diretamente aos seus respectivos IP's (por exemplo, no Node-Red). Além disso, a utilização de IP's estáticos facilita a identificação de equipamentos com problemas, como falta de conexão. É essencial ter os dados mapeados de forma clara e precisa, e os equipamentos devem ser isolados para garantir a integridade das informações.

6.2.2 Métodos de transmissão de dados

As máquinas dentro da infraestrutura da Siemens Gamesa possuem diversos mecanismos de transmissão de dados para a base de dados central. A escolha do método de transmissão depende maioritariamente do tipo de máquina.

Moldes

Para casos em que é necessário uma rede de automação distribuída para captura de dados, devido às dimensões do produto a ser fabricado, como nos moldes. Existe um *middle man* que agrupa o conjunto de dados de todos os dispositivos num Node-RED local e envia diretamente para a base de dados a informação do processo.

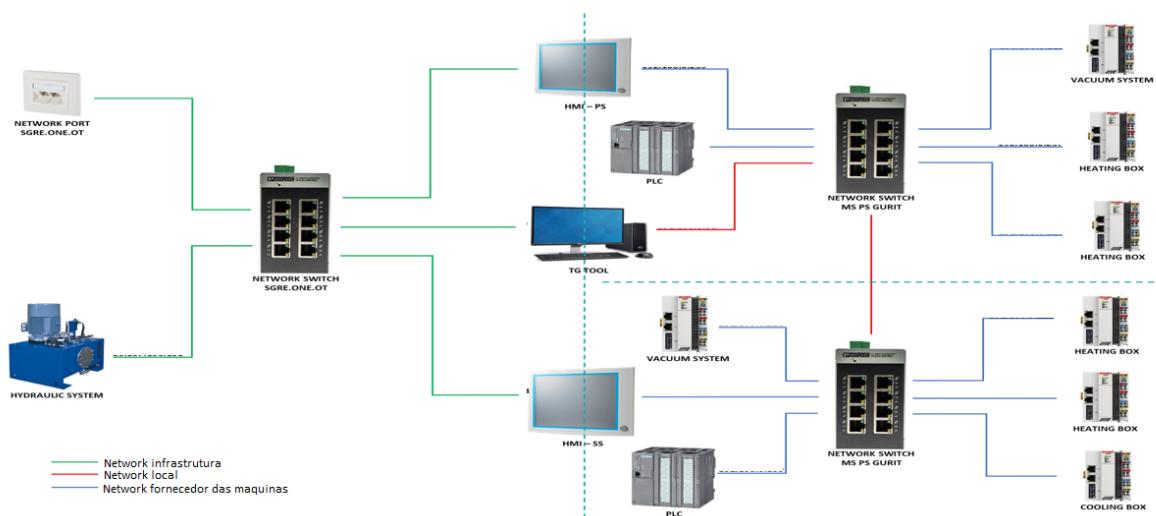


Figura 3: Arquitetura de rede de um molde

Os dados são inicialmente coletados pelo Controlador Lógico Programável (PLC), capturando as mé-

tricas dos sensores em tempo real. Os dados são transmitidos para o PLC e para uma Base de dados SQL local na Interface Homem-Máquina (HMI) através da *Network* do fornecedor das máquinas.

Em paralelo, o PC do *TG Tool* executa uma instância do Node-RED, capturando dados da HMI e diretamente do PLC. O Node-RED agrupa e processa esses dados, por Modbus, executando tarefas adicionais de formatação, validação e integração para garantir consistência e integridade para o SPC.

Por último os dados são encaminhados para a base de dados principal através de uma ligação de rede segura (rede OT). Isto garante a integridade e confidencialidade dos dados durante a transmissão.

Outras máquinas

As máquinas transmitem dados de processo de diferentes maneiras, integrando tecnologias variadas para garantir a eficiência e a precisão na comunicação, dependendo das necessidades e limitações dos dispositivos.

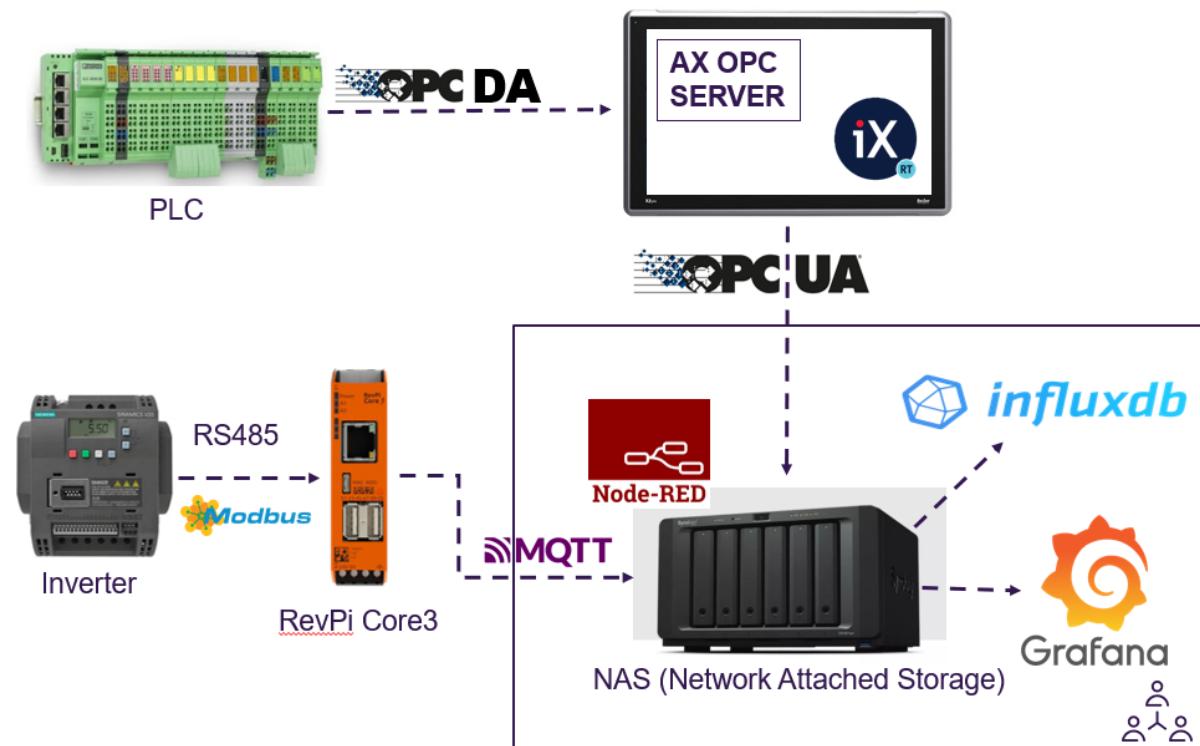


Figura 4: Transmissão de dados máquina

Os dois cenários mais comuns são utilizar o PLC da máquina, que gera os dados de processo, para se comunicar via OPC UA com o Node-Red da NAS. Se necessário, pode-se empregar um servidor AX OPC devido ao método de transmissão proprietário OPC DA do fornecedor do PLC. No segundo cenário, o variador eletrônico de velocidade (vev) comunica-se por RS485 utilizando o protocolo Modbus com um RevPi, que então transmite os dados via MQTT para o Node-Red.

6.3 Criação e manutenção da Base de Dados

A criação e manutenção de uma base de dados SQL é um aspeto fundamental da implementação do Controlo Estatístico de Processo (SPC) num ambiente de fabrico. Esta secção fornece uma visão geral detalhada do processo envolvido na configuração da base de dados num dispositivo *Network-Attached Storage* (NAS), explicando a finalidade de usar uma NAS e destacando os benefícios de aproveitar o seu *Container Manager* para uma manutenção eficiente da base de dados. Para o projeto, foi usado o Microsoft SQL Server (MSSQL) como solução de base de dados.

6.3.1 Porquê SQL?

Ao projetar a solução de armazenamento de dados para o sistema SPC, a escolha de uma base de dados SQL em vez de outras opções NoSQL, como bases de dados orientados a documentos, orientados a gráficos ou até a já existente *Time-Series*, foi motivada por vários fatores-chave.

Um dos principais motivos para selecionar uma base de dados SQL é sua versatilidade no tratamento de consultas complexas e agregações de dados. As bases de dados SQL são excelentes na execução de operações como *JOINS*, *GROUP BYs* e consultas aninhadas, que são essenciais para analisar e agrregar dados em diferentes dimensões. Esse recurso é particularmente benéfico para nosso sistema SPC, onde tais operações são frequentemente necessárias para gerar relatórios e painéis detalhados.

Ao contrário de bases de dados orientados a gráficos, que são otimizados para lidar com dados interconectados, a estrutura de dados do projeto é relativamente simples. As informações exigidas de cada processo estão contidas na mesma tabela, com exceção dos comentários, que são utilizados para casos especiais. Dada esta estrutura simples, o modelo relacional SQL é mais adequado e eficiente para as necessidades encontradas.

Como os dados são transformados e processados através de ETL, uma base de dados orientada a documentos, que se destaca no armazenamento de dados não estruturados ou semi-estruturados, não oferece vantagens significativas. As bases de dados SQL são adequadas para armazenar dados estruturados e garantir a integridade dos dados por meio de definições e restrições de esquema robustas.

O uso generalizado e a popularidade de SQL significa que a maioria dos *developers* e cientistas de dados estão familiarizados com a sintaxe SQL e as práticas de gerência de base de dados. Esta familiaridade é crucial para um projeto industrial, onde é importante implementar soluções que possam ser facilmente mantidas e ampliadas por equipas externas ou novos membros do projeto. A utilização de uma base de dados SQL garante que o sistema permaneça acessível, mesmo que não fosse necessariamente

a abordagem mais eficiente para todos os cenários.

Embora bases de dados NoSQL, como *Time-Series*, sejam otimizadas para lidar com grandes volumes de dados com carimbo de data/hora, SQL evoluiu para lidar com cargas de dados substanciais com eficiência. Com estratégias adequadas de indexação, particionamento e otimização, as bases de dados SQL podem oferecer desempenho e escalabilidade robustos, atendendo às necessidades do sistema SPC.

Em suma, a decisão de usar uma base de dados SQL foi motivada por sua versatilidade no tratamento de consultas, adequação à estrutura de dados visionada, capacidade de gerência com eficiência os dados transformados, ampla familiaridade entre os profissionais e escalabilidade e desempenho comprovados. Esses fatores garantem coletivamente que o sistema SPC permaneça robusto, eficiente e acessível a uma ampla gama de usuários e *developers*. Os recursos e benefícios de SQL se tornarão mais aparentes no contexto da aplicação principal que será explicada mais à frente.

6.3.2 Propósito de uma NAS em manutenção de Base de dados

Um dispositivo *Network-Attached Storage* (NAS) [17] é um sistema especializado de armazenamento de arquivos conectado a uma rede que permite o armazenamento e recuperação de dados de uma localização central para usuários de rede autorizados e clientes heterogéneos. Os dispositivos NAS são altamente versáteis e oferecem diversas vantagens para manutenção de base de dados:

1. **Armazenamento centralizado:** NAS fornece uma solução de armazenamento centralizada que pode ser acedida por vários clientes e dispositivos na rede. Essa centralização garante que todos os dados sejam armazenados num local único e seguro, facilitando a manutenção e o backup.
2. **Escalabilidade:** Os sistemas NAS são projetados para serem facilmente expansíveis. À medida que aumentam as necessidades de armazenamento de dados, é possível adicionar armazenamento adicional sem interrupções significativas na infraestrutura existente.
3. **Segurança e redundância de dados:** Os dispositivos NAS normalmente oferecem vários recursos de proteção de dados, como configurações RAID, que fornecem redundância e melhoram a segurança dos dados. Isso garante que mesmo se uma unidade falhar, os dados permanecerão seguros e acessíveis.
4. **Acessibilidade e colaboração:** NAS permite fácil partilha de dados e colaboração entre vários usuários. Os usuários autorizados podem aceder os dados de qualquer lugar na rede, facilitando a colaboração e o partilha de dados em tempo real.

6.3.3 Uso de Container Manager

Os dispositivos NAS modernos geralmente vêm equipados com recursos de manutenção de contentores semelhantes ao Docker, que fornece um ambiente eficiente e isolado para a execução de aplicações. Utilizar o *Container Manager* oferece vários benefícios:

1. **Isolamento e manutenção de recursos:** Os contentores isolam as aplicações do sistema subjacente e uns dos outros, garantindo que a base de dados SQL seja executada num ambiente dedicado com recursos alocados. Este isolamento ajuda a prevenir conflitos e melhora a estabilidade.
2. **Fácil implementação e escalabilidade:** Os contentores podem ser facilmente implementados, atualizados e escalados. Se a carga da base de dados aumentar, instâncias de contentores adicionais podem ser lançadas para lidar com a carga extra sem trazer grande impacto à infraestrutura existente.
3. **Manutenção simplificada:** Contentores simplificam a manutenção da base de dados. Atualizações podem ser aplicadas à imagem do contentor e, em seguida, o contentor atualizado pode ser implementado, reduzindo o tempo de inatividade e minimizando o risco de erros de configuração.
4. **Ambientes consistentes:** Contentores garantem que a base de dados seja executada num ambiente consistente em diferentes estágios do desenvolvimento, teste e produção. Essa consistência reduz a probabilidade de problemas causados por diferenças no ambiente.

6.3.4 Manutenção da base de dados

A manutenção da base de dados SQL envolve diversas práticas críticas para garantir o seu desempenho e segurança. Backups regulares são essenciais para proteção contra perda ou corrupção de dados. Esses backups devem ser armazenados de forma segura e testados periodicamente para garantir que possam ser restaurados quando necessário. Na Siemens Gamesa, em geral, são feitos backups todos os anos.

A supervisão contínua do desempenho da base de dados é necessário para identificar e solucionar quaisquer gargalos ou problemas. Isso inclui tarefas como indexação, otimização de consultas e arquivamento de dados antigos para manter o desempenho ideal. O *Container Manager* é uma excelente ferramenta para isso.

A segurança é uma prioridade máxima na manutenção da base de dados. A implementação de medidas de segurança robustas, como a configuração de *firewalls*, o uso de senhas fortes, a ativação

da criptografia e a aplicação imediata de atualizações de segurança, é crucial para proteger a base de dados contra acessos não autorizados e vulnerabilidades. O que é facilitado pelo uso de um dispositivo *Network-Attached Storage* (NAS).

Além disso, as verificações de integridade dos dados devem ser realizadas regularmente para garantir a precisão e a consistência dos dados armazenados. Ferramentas e *scripts* automatizados podem ajudar a detetar e corrigir quaisquer problemas de integridade, garantindo que a base de dados permaneça confiável para o sistema SPC.

Configurar e manter uma base de dados SQL num dispositivo NAS fornece uma solução robusta e escalável para armazenar os dados necessários para SPC. O armazenamento centralizado, a escalabilidade e os recursos de segurança dos dispositivos NAS, combinados com a eficiência e o isolamento fornecidos pelo *Container Manager*, garantem um ambiente de base de dados seguro e eficiente. Seguindo as melhores práticas para configuração, manutenção e segurança, é possível garantir que o sistema SPC tenha uma base sólida para monitorização contínuo e melhoria de processos.

6.4 Levantamento de dados

O levantamento eficaz de dados é um componente crítico da implementação do Controlo Estatístico de Processo (SPC). O processo de levantamento de dados constitui a base da monitorização, análise e melhoria contínua no processo de fabrico. Para este projeto, foi usado o Node-RED como principal ferramenta para levantamento de dados devido à sua flexibilidade, facilidade de uso e recursos poderosos.

6.4.1 Introdução ao Node-Red

Node-RED é uma ferramenta de desenvolvimento baseada em fluxo originalmente desenvolvida pela IBM para conectar dispositivos de hardware, APIs e serviços online. Utiliza Java Script como linguagem de programação e fornece uma interface visual para criar fluxos de trabalho conectando *nodes*, que representam várias funções, como *input*, *processing* e *output* de dados. Essa abordagem permite que os usuários projetem fluxos de dados complexos com codificação mínima, tornando-os acessíveis tanto para *developers* quanto para *non-developers*.

6.4.2 Como funciona

O Node-RED opera permitindo que os usuários criem uma série de nodos interconectados, cada um executando uma tarefa específica dentro de um fluxo. Essas tarefas podem incluir:

- **Nodos de input:** Levantamento de dados de diversas fontes, como sensores, máquinas e bases de dados.
- **Nodos de processamento:** Transformação, filtro e agregação dos dados levantados.
- **Nodos de output:** Envio dos dados processados para vários destinos, como bases de dados, dashboards ou outros aplicativos.

Cada nodo pode ser configurado para executar uma função específica e os nodos podem ser conectados para formar um fluxo que representa todo o pipeline de levantamento e processamento de dados.

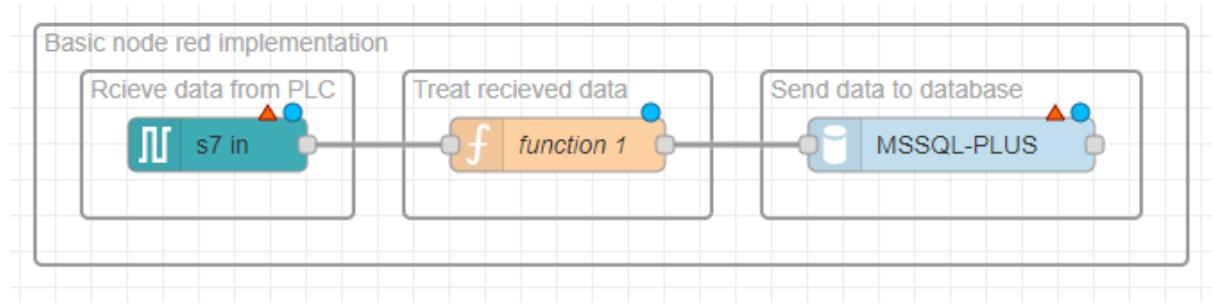


Figura 5: Exemplo de um *flow* de dados no node-red.

Uma conexão à máquina recebe dados de um processo que são enviados para outros nodos para processamento adicional. Esses dados são transmitidos em mensagens (msg) no formato JSON, com as informações armazenadas, por defeito, em *msg.payload*. Para além disso, outras categorias podem ser criadas pelo usuário dentro dessas mensagens para facilitar o processamento dos dados.

6.4.3 Capacidades do Node-Red

A extensa biblioteca de nodos do Node-RED fornece uma ampla gama de recursos que são essenciais para um levantamento de dados eficaz no sistema SPC:

1. **Conectividade de máquina:** O Node-RED suporta a importação de nodos que se podem conectar a várias máquinas e protocolos industriais, como Modbus, OPC-UA e MQTT. Esses nodos facilitam o levantamento direto de dados das máquinas e equipamentos de fabrico, garantindo que os dados em tempo real sejam capturados com precisão.
2. **Transformação de dados:** Com os seus nodos de processamento, o Node-RED pode realizar diversas tarefas de transformação de dados. Isso inclui filtragem, agregação, normalização e

enriquecimento de dados. Essas transformações são cruciais para preparar os dados num formato adequado para análise e armazenamento.

3. **Integração de base de dados:** O Node-RED pode inserir diretamente os dados transformados em base de dados. Este projeto usou uma base de dados SQL para armazenar dados SPC. Os recursos ETL (Extract, Transform, Load) do Node-RED garantem que os dados sejam pré-processados e prontos para uso imediato na análise SPC. Ao inserir dados diretamente na base de Dados, podemos manter um sistema de armazenamento de dados simplificado e eficiente que suporta análise em tempo real sem a necessidade de pós-processamento extenso.

6.5 Migração de dados

A migração de dados é uma etapa fundamental na transição de uma base de dados de *Time Series* para uma base de dados SQL para otimizar nosso sistema SPC. Python desempenha um papel crucial neste processo, facilitando a conexão com ambas as bases de dados e permitindo a transferência eficiente dos dados.

O processo de migração começa com o estabelecimento de conexões com a base de dados *Time Series*. Para conectar à base de dados *Time Series*, foi usada a biblioteca Python **influxdb** que permite consultar e recuperar os dados históricos armazenados à base de dados *InfluxDB*.

Simultaneamente, é conectada a base de dados SQL que envolve o uso da biblioteca **pyodbc** para estabelecer uma conexão com o servidor MSSQL. Essa biblioteca permite criar e manipular tabelas, inserir dados e executar consultas SQL.

O script de migração normalmente recupera pacotes de dados da *Time Series*, processa e transforma os dados conforme necessário e, em seguida, insere-os na base de dados SQL. Este processo garante que os dados sejam pré-processados e formatados corretamente para uso no sistema SPC. A biblioteca **pandas** é particularmente útil, pois fornece ferramentas de manipulação de dados, permitindo limpar, transformar e preparar os dados antes de inseri-los na base de dados.

Em suma, o processo de migração de dados aproveita as extensas bibliotecas do Python para se conectar às bases de dados, facilitando consultas, transformações e transferências eficientes de dados. Esta transição é essencial para otimizar o sistema SPC, garantindo que os dados históricos sejam preservados e prontamente disponíveis para análise, melhorando assim a eficácia e eficiência globais do sistema.

6.6 Desenvolvimento da aplicação

A aplicação SPC é uma ferramenta abrangente que integra processamento e visualização de dados para fornecer *insights* sobre o desempenho do processo. É constituída por uma estrutura de código modular, um *backend* de base de dados robusto e uma interface de usuário intuitiva. Cada componente é projetado para interagir perfeitamente com os outros, garantindo uma experiência de usuário suave e desempenho confiável.

6.6.1 Estrutura do código

A base de código é implementada em **Python** e segue uma arquitetura básica orientada a objetos. A programação orientada a objetos (POO) é um paradigma de programação que organiza o design de software em torno de dados, ou objetos, em vez de funções e lógica. Um objeto, também conhecido como classe, pode ser definido como um campo de dados que tem atributos e comportamento exclusivos. O POO oferece várias vantagens:

- **Modularidade:** O código é dividido em objetos independentes, facilitando a sua manutenção e modificação.
- **Reutilização:** Os objetos podem ser reutilizados na aplicação, reduzindo a redundância.
- **Manutenção:** As alterações no código são mais fáceis de implementar, melhorando a manutenção a longo prazo.

Classe API

Esta classe lida com todas as consultas à base de dados, garantindo recuperação e manipulação de dados eficientes e seguras. Atua como um intermediário entre a base de dados e os outros componentes da aplicação, fornecendo uma interface limpa para operações de dados. Utiliza a biblioteca **pyodbc** para comunicar com a base de dados, assegurando uma conexão confiável e operações robustas.

A biblioteca **pyodbc** é uma escolha popular para a conexão de aplicações **Python** com bases de dados ODBC. Oferece uma interface simples e eficaz para executar consultas **SQL** e manipular dados. O **pyodbc** é amplamente utilizado devido à sua compatibilidade com várias bases de dados e à facilidade de integração com aplicações **Python**. No entanto, é importante notar que depende das drivers ODBC fornecidas pelo sistema operacional, o que pode apresentar algumas limitações.

Em ambientes Windows, por exemplo, é necessário que as drivers ODBC adequadas estejam instaladas e configuradas, o que pode ser uma desvantagem em ambientes virtuais ou em sistemas onde a instalação de software adicional é restrita. Esta dependência das drivers pode complicar a implantação em certas infraestruturas, especialmente em ambientes de contentores ou em sistemas operacionais alternativos onde as drivers ODBC podem não estar prontamente disponíveis ou configuradas corretamente. Apesar dessas limitações, o **pyodbc** continua a ser uma ferramenta valiosa para muitas aplicações devido à sua robustez e suporte a uma ampla gama de bases de dados.

Classe SPC

É responsável por todas as tarefas de processamento de dados, incluindo a criação de cartas de controlo usando dados de processo e aplicando as *three-sigma rules*. Verifica os valores fora dos limites de especificação e aqueles fora dos limites de controlo. Além disso, calcula as *Nelson Rules* dando uso a outra classe dedicada, *Nelson_Rules*, que encapsula a lógica para essas verificações específicas. Foi utilizada a biblioteca **pandas** para realizar os cálculos necessários e a biblioteca **matplotlib** para a criação das cartas de controlo.

A biblioteca **pandas** é extremamente poderosa e versátil para manipulação e análise de dados. Sua capacidade de lidar com grandes conjuntos de dados de forma eficiente torna-a uma excelente escolha para operações de processamento de dados no SPC. As funcionalidades de pandas, como a criação e manipulação de DataFrames, facilitam a aplicação de regras estatísticas e a realização de cálculos complexos. No entanto, para operações muito específicas ou de alto desempenho em grandes volumes de dados, pode haver a necessidade de otimizações adicionais ou o uso de bibliotecas complementares. Apesar dessas limitações, pandas oferece uma combinação robusta de funcionalidade e facilidade de uso, sendo amplamente adequada para as necessidades do projeto.

Por sua vez, **matplotlib** é amplamente utilizada para a criação de gráficos e visualizações. Permite a geração de cartas de controlo detalhadas e personalizáveis, proporcionando uma visualização clara e intuitiva dos dados de processo e dos limites de controlo. Embora **matplotlib** possa ser considerada menos intuitiva para usuários iniciantes e possa requerer um maior esforço para criar visualizações altamente customizadas, a sua flexibilidade e poder tornam-na numa ferramenta valiosa para a criação de cartas de controlo no contexto do SPC.

Classe Page

Classe que gera todos os aspectos da interface e as interações do usuário com a aplicação. Garante que os usuários possam navegar facilmente na aplicação, inserir comentários, visualizar gráficos e relatórios. A classe *Page* integra-se com as classes *API* e *SPC* para fornecer uma experiência de usuário perfeita e responsiva. Foi utilizada a biblioteca **tkinter** para a construção da interface, uma biblioteca um pouco limitada em termos de funcionalidades e estética comparada a outras opções mais modernas, massim-
ples de utilizar e suficiente para as necessidades do projeto. A facilidade de uso e a integração direta com o **Python** tornam-na uma escolha prática para aplicações que não requerem interfaces altamente complexas ou estilizadas.

Estas classes não são os componentes exclusivos da aplicação, mas são os principais que impulsio-
nam sua funcionalidade principal.

Para ilustrar como essas classes se comunicam entre si, considere a seguinte hierarquia:

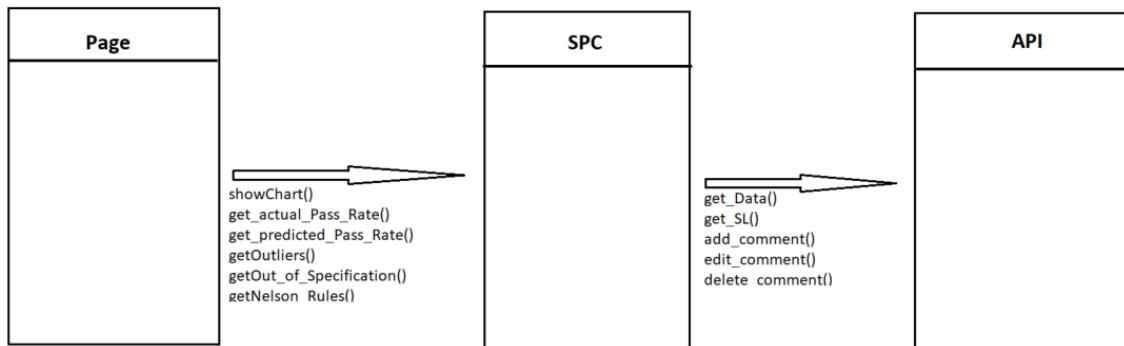


Figura 6: Comunicação da aplicação - exemplo resumido

A classe *Page* interage diretamente com a classe *SPC*, que, por sua vez, comunica com a classe *API*. Esta estrutura de comunicação em camadas garante uma separação clara das preocupações e promove a modularidade. A classe *Page* lida com interações do usuário e passa dados relevantes para a classe *SPC* para processamento. Em seguida, a classe *SPC* consulta ou atualiza a base de dados através da classe *API*, encapsulando as operações da base de dados e mantendo a lógica do processamento de dados isolada da interface do usuário.

6.6.2 Estrutura da base de dados

A base de dados é a espinha dorsal da aplicação *SPC*, garantindo que os dados sejam armazenados de forma segura e eficiente. O esquema da base de dados inclui tabelas para dados processados, informa-

ções dos limites de especificação, e comentários adicionados pelo usuários. Essa abordagem estruturada permite que a aplicação lide com grandes volumes de dados, mantendo o seu desempenho.

Foram criadas várias *databases*, cada uma dedicada a um processo específico. Um processo é composto por diversas características, que são depois analisadas no contexto do SPC. Ao manter cada processo na sua própria base de dados, garantimos uma melhor organização, separando as características de diferentes processos. Isso facilita também o uso de tabelas auxiliares para os limites de especificação e comentários.

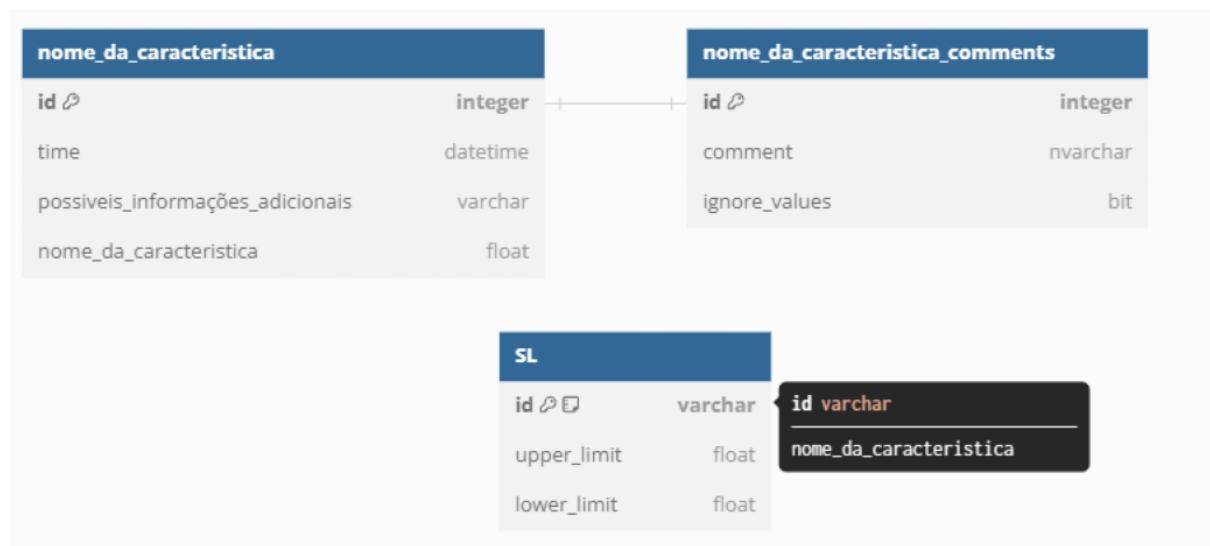


Figura 7: Database Schema para um processo

A tabela principal terá o nome correspondente à característica específica. Esta tabela deve obrigatoriamente conter um identificador (**id**), que será uma chave primária do tipo *identity*, um campo de data e hora (**time**) do tipo *datetime*, e um campo do tipo *float* cujo nome será igual ao da tabela. Além disso, é possível adicionar mais colunas para informações adicionais necessárias, como o número de pá, molde, máquina utilizada, entre outras.

A tabela SL é responsável por fornecer os valores para os limites de especificação. Esta tabela contém um identificador (**id**), que será o nome da especificação, assim como campos para os limites superiores (**upper_limit**) e inferiores (**lower_limit**) de especificação.

Para possibilitar que os utilizadores adicionem comentários, foi criada uma tabela para cada característica, destinada a armazenar os mesmos. Esta tabela tem o mesmo nome da tabela da característica, acrescido de *_comments* no final, para poder diferenciá-las entre si. Esta tabela é composta pelo identificador do valor ao qual o comentário se refere, um campo para o comentário em si (**comment**), e um campo do tipo bit (**ignore_values**) que indica se o valor comentado deve ser ignorado nas métricas do

Controlo Estatístico do Processo. Se o valor for ignorado, ele é apresentado mas não é valido nos cálculos; caso contrário, o valor é considerado.

6.6.3 Interface do usuário

A interface do usuário (UI) do SPC é projetada com foco na usabilidade e clareza. O painel serve como o hub central onde os usuários podem obter uma visão geral do desempenho do processo selecionado por meio de estatísticas resumidas e indicadores-chave de desempenho.

O propósito da interface é apresentar o processo de forma clara e sucinta, possibilitando a utilizadores mesmo com pouco conhecimento de estatística perceber o estado do mesmo.

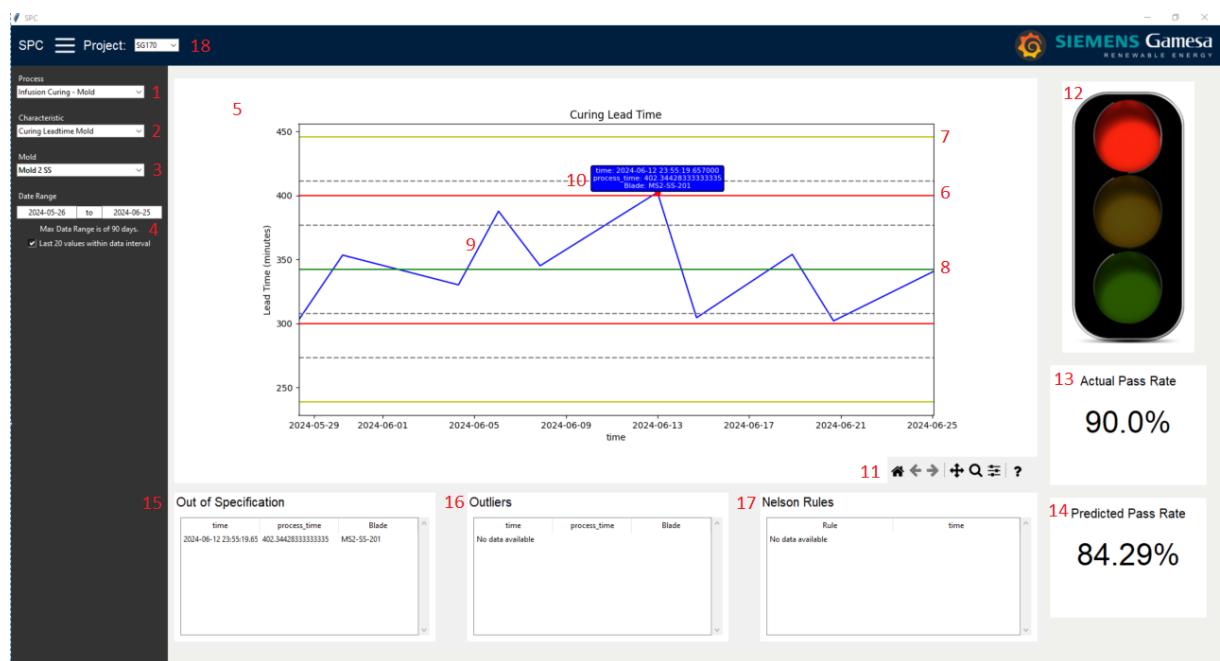


Figura 8: Interface da aplicação

Neste exemplo de um processo básico os vários elementos da interface estão destacados através da legenda fornecida. Cada número na legenda corresponde a uma parte crucial da interface, destacando os principais recursos e funcionalidades.

1. **Escolha do Processo:** Cada processo é constituído por várias características e existem vários processos, pelo que esta *combobox* serve para diferenciar entre eles;
2. **Escolha da Característica:** *combobox* para selecionar a característica do processo escolhido no ponto 1;

3. **Escolha adicional:** dependendo do processo e característica, é possível ser necessário fazer uma escolha adicional, como molde ou máquina, pelo que esta *combobox* aparece caso necessário;
4. **Intervalo de Tempo:** serve para decidir o intervalo de tempo que os dados se encontram. Também tem a opção de limitar a informação aos últimos 20 elementos dentro desse intervalo. Por defeito está para o último mês;
5. **Carta de Controlo:** carta de controlo que apresenta informação sobre o estado do processo;
6. **Limite de Especificação:** limite especificado pela Simenes para os valores do processo;
7. **Limite de Controlo:** limite de controlo de acordo com as *three sigma rules* [2.1](#);
8. **Média:** média dos valores apresentados na carta de controlo;
9. **Valores:** gráfico de linha dos valores do processo selecionado;
10. **Destaque Pop-up:** apresenta informação adicional no valor selecionado ao passar o rato;
11. **Barra de Ferramentas:** barra de ferramentas da carta de controlo, permite fazer zoom, mover, alterar definições e apresentar informação do processo/característica adicional;
12. **Semáforo:** semáforo que apresenta o estado do processo e se este requer atenção:
 - **Vermelho:** quando a percentagem dos valores dentro dos limites de especificação é inferior a 98%.
 - **Amarelo:** quando a percentagem dos valores dentro dos limites de especificação é superior a 98 mas existe algum valor fora dos limites de controlo ou especificação.
 - **Verde:** quando não existe nenhum valor fora dos limites de especificação ou de controlo.
13. **Taxa de aprovação real:** percentagem dos valores que se encontram dentro dos limites de especificação;
14. **Taxa de aprovação prevista:** percentagem dos valores que estão previstos se encontrar dentro dos limites de especificação. Calcula o *z-score* para os limites superior e inferior, utiliza a *z-table* para conseguir a probabilidade comutativa dos dois e faz a *standard normal distribution* entre eles para devolver a percentagem;[\[18\]](#)
15. **Valores fora de especificação:** tabela que apresenta todos os valores que se encontram fora dos limites de especificação;

16. **Outliers:** tabela que apresenta todos os valores que se encontram fora dos limites de controlo (aka *outliers*);
17. **Nelson Rules:** tabela que apresenta os valores que não respeitam as *Nelson rules* 2.3;
18. **Projeto:** combobox para a escolha do projeto, pode ser SG170 ou SG145. O número referencia o tamanho do diâmetro total da ventoinha eólica, pelo que um valor maior implica uma pá maior.

Para além deste caso básico existem processos que utilizam uma grande quantidade de sensores, e como o objetivo é avaliar o comportamento de cada sensor individual, isto implica situações em que o utilizador teria que ir a cada sensor verificar os seu estado. Com o intuito de facilitar este processo foi criada uma matriz de botões a cores de acordo com o estado do semáforo para esse sensor.

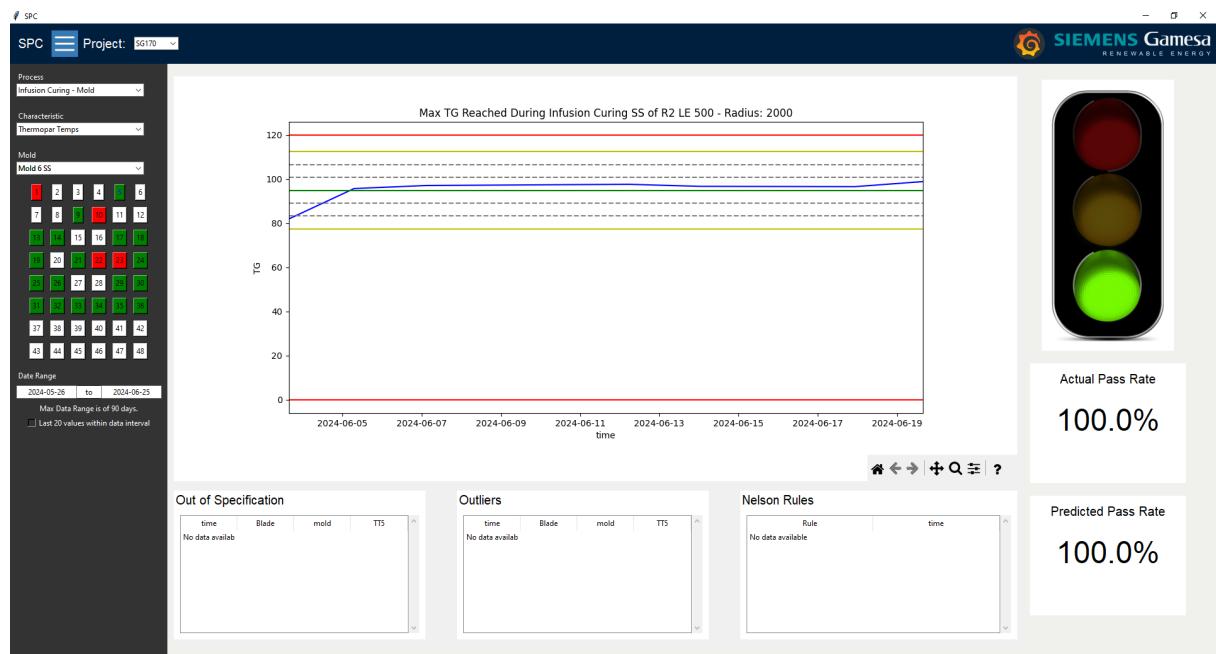


Figura 9: Exemplo de um processo com vários sensores

Neste exemplo os botões tem a mesma cor que o seu respetivo semáforo e ficam a branco os que não contém informação nesse intervalo (nem todos os sensores são usados ao longo do processo).

Interação

O utilizador pode interagir de diversas formas para facilitar a compreensão da informação apresentada. Uma dessas funcionalidades é a seleção de elementos na tabela das *Nelson Rules*, que são usadas para detetar anomalias em processos de produção.

Quando o utilizador seleciona um elemento na tabela, a aplicação exibe um *pop-up* com a explicação detalhada da regra que foi quebrada. Esta explicação ajuda o utilizador a entender a natureza da anomalia e a razão pela qual a regra foi violada. Além disso, os pontos específicos que desrespeitam a regra ficam destacados a vermelho na carta de controlo. Este destaque visual facilita a identificação imediata dos pontos problemáticos, permitindo uma análise mais rápida e eficaz.



Figura 10: Iteração com as *Nelson Rules*

Ao fornecer explicações claras e detalhadas sobre as regras quebradas, a aplicação melhora a compreensão das anomalias e facilita a tomada de decisões informadas. A capacidade de destacar visualmente os pontos problemáticos ajuda os utilizadores a focarem-se rapidamente nas áreas que necessitam de atenção, aumentando a eficiência na análise e resolução de problemas. Além disso, esta funcionalidade contribui para a transparência e a monitorização dos dados, pois permite que todos os utilizadores da aplicação compreendam os motivos das violações das regras e identifiquem facilmente os pontos que as desrespeitam.

A interação com a tabela das *Nelson Rules* na aplicação é uma funcionalidade essencial que melhora a clareza, a eficiência e a transparência na monitorização e análise de processos de produção. Ao fornecer explicações detalhadas e destaque visual, a aplicação ajuda os utilizadores a entender melhor as anomalias e a agir rapidamente para corrigir quaisquer problemas identificados.

Para além disso, é também possível adicionar comentários diretamente nos pontos. Esta funcionalidade é crucial para documentar e explicar anomalias ou desvios dos valores esperados durante o

processo de monitorização.

Durante a análise das cartas de controlo, o utilizador pode identificar pontos onde os valores se desviaram significativamente do esperado. Estes pontos podem indicar anomalias, eventos específicos ou mudanças no processo. Ao clicar no ponto específico no gráfico onde ocorreu a anomalia, a aplicação exibe um *pop-up* que serve como interface para introduzir informações adicionais.

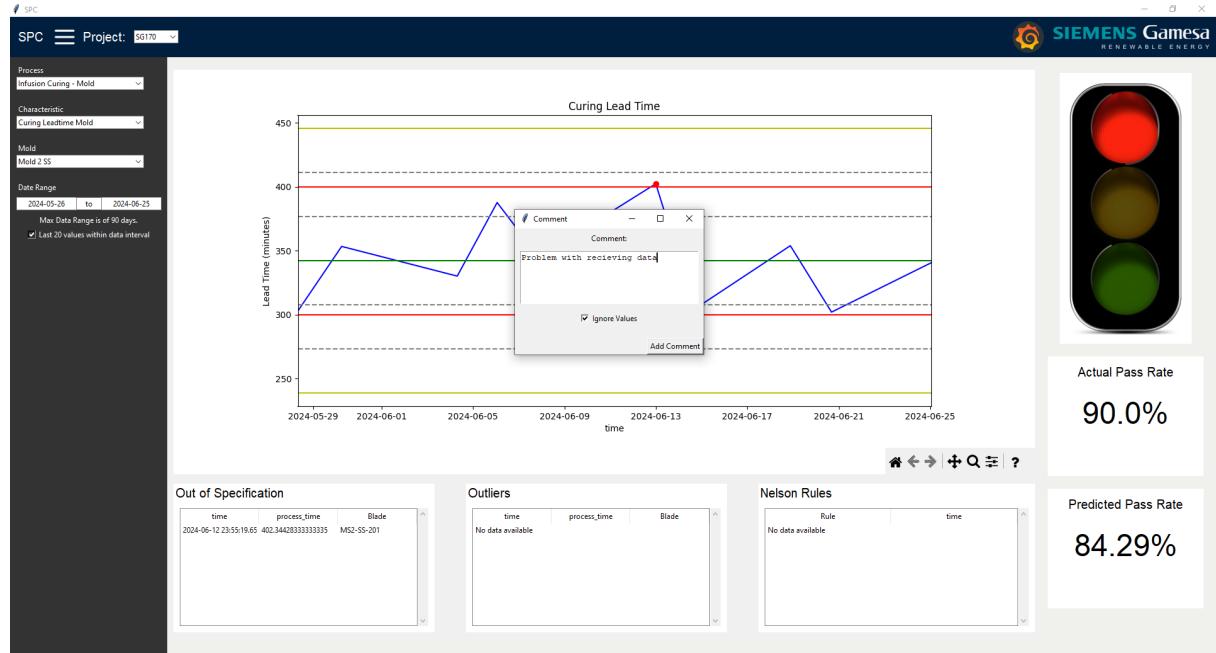


Figura 11: Adicionar um comentário

No *pop-up*, o utilizador pode escrever um comentário detalhado explicando a razão da divergência observada. Por exemplo, pode mencionar que um teste específico estava a ser realizado, houve uma falha técnica temporária, ocorreram alterações nas matérias-primas ou nos métodos de produção, ou houve interferências ambientais ou operacionais. O comentário deve ser claro e detalhado, fornecendo contexto suficiente para que outros membros da equipa ou futuros analisadores entendam o que ocorreu. Após escrever o comentário, o utilizador confirma a inserção da informação no sistema. O comentário fica então associado ao ponto ou valor específico no gráfico, permitindo uma consulta fácil e rápida no futuro.

Ao adicionar o comentário existe a opção de ignorar ou não o valor, desta forma, se o valor for ignorado, irá aparecer na mesma na carta de controlo, mas não será contabilizado para as métricas de SPC. O ponto ignorado saí do gráfico de linha e fica a preto, os pontos não ignorados com comentários, por outro lado, mantém-se na linha e ficam com um ponto a azul para fácil identificação.

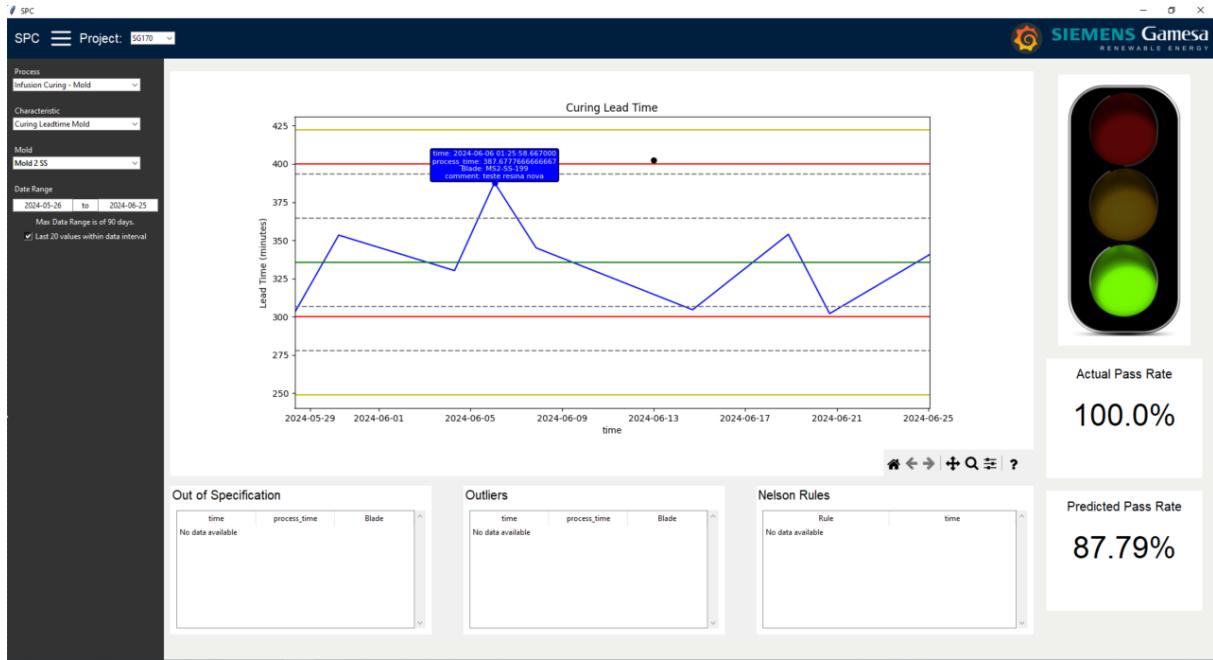


Figura 12: Após adicionar comentários

Esta funcionalidade oferece vários benefícios importantes. Documenta eventos incomuns ou desvios, criando um histórico que pode ser consultado posteriormente, o que melhora a monitorização dos dados. Facilita a comunicação entre os membros da equipa, permitindo que todos compreendam as razões por trás das anomalias ou desvios, e mantém um registo detalhado que é útil para auditorias, revisões e relatórios de qualidade. Além disso, ajuda na análise de causas raízes e na implementação de ações corretivas, contribuindo para a melhoria contínua do processo.

A capacidade de adicionar comentários diretamente nas cartas de controlo é, portanto, uma funcionalidade essencial da aplicação desenvolvida. Não só melhora a clareza e a transparência na monitorização dos processos, como facilita a comunicação e a análise colaborativa dos dados.

6.6.4 Instalação da aplicação

Para garantir a distribuição perfeita do aplicativo SPC, foi usado **PyInstaller** [19] para empacotar o código **Python** num executável independente. Este capítulo discute os benefícios e pontos fracos do uso do **PyInstaller** e destaca as vantagens de distribuir um executável em vez de um *script*, principalmente em termos de tratamento de dependências das bibliotecas.

Benefícios de PyInstaller

PyInstaller simplifica o processo de empacotamento de aplicações **Python**, simplificando a distribuição. Oferece suporte a vários sistemas operacionais, incluindo Windows, macOS e Linux, permitindo que a mesma ferramenta seja usada para criar executáveis em sistemas diferentes. Uma das suas vantagens significativas é a capacidade de detetar e incluir automaticamente todas as dependências necessárias, garantindo que o executável contenha todas as bibliotecas e módulos necessários, reduzindo o risco de perda de dependências. Além disso, o **PyInstaller** pode criar um único arquivo executável, o que simplifica a distribuição, permitindo aos usuários baixar e executar um arquivo sem se preocupar com múltiplas dependências ou etapas de instalação. Empacotar o *script* num executável também fornece uma camada de segurança, protegendo a propriedade intelectual e evitando adulterações.

Fraquezas do PyInstaller

Apesar de suas vantagens, o **PyInstaller** apresenta alguns pontos fracos. Os executáveis gerados podem ser significativamente maiores que o *script* original devido à inclusão de todas as dependências e do interpretador **Python**. A depuração de um executável pode ser mais desafiadora do que a depuração de um *script*, pois os problemas podem exigir a descompactação do executável ou o uso de ferramentas de depuração adicionais. Embora o **PyInstaller** tenha como objetivo oferecer suporte a várias bibliotecas e pacotes, algumas dependências complexas podem não ser agrupadas corretamente, levando a erros de tempo de execução. Além disso, o executável incluído pode apresentar uma levea sobrecarga de desempenho em comparação com a execução do *script* **Python** original devido ao processo de empacotamento e à inclusão do interpretador. Também é perceptível que o aplicativo demora um pouco para abrir ao usar o executável em comparação com a execução direta do *script*. Esse atraso provavelmente se deve ao tempo necessário para o executável descompactar os componentes incluídos e inicializar o interpretador **Python** incorporado.

Benefícios de usar um executável em vez de um script

Criar um executável a partir de um *script* **Python** oferece diversas vantagens, especialmente no que diz respeito às dependências das bibliotecas. Um executável simplifica o processo de implementação, pois os usuários não precisam instalar **Python** ou qualquer biblioteca necessária, reduzindo o potencial de erros durante a instalação e garantindo que a aplicação seja executada conforme planeado em qualquer sistema de destino. Ao empacotar o *script* com todas as suas dependências, o executável garante um ambiente de execução consistente, eliminando problemas relacionados a diferentes versões de bibliote-

cas ou configurações de sistema que poderiam afetar o comportamento do aplicativo. Os usuários finais beneficiam da conveniência de executar um executável independente, pois não precisam configurar um ambiente **Python** ou gerir dependências, tornando o seu uso mais acessível para utilizadores não técnicos. Distribuir um único arquivo executável é mais gerível do que fornecer um *script* com uma lista de dependências, reduzindo a probabilidade de dependências perdidas e simplificando o processo de distribuição da aplicação. O executável é executado num ambiente isolado, minimizando conflitos com outros softwares no sistema do usuário e evitando problemas que possam surgir de dependências compartilhadas ou variáveis de ambiente.

Conclusão

Usar **PyInstaller** para criar um executável oferece vários benefícios, incluindo facilidade de uso, compatibilidade entre plataformas e implantação simplificada. Embora existam alguns pontos fracos, como tamanhos de arquivo maiores, maiores dificuldades de depuração e um ligeiro atraso na inicialização do aplicativo, as vantagens de fornecer um executável independente superam essas desvantagens. O executável garante um ambiente consistente, simplifica a experiência do usuário e melhora o processo geral de distribuição ao lidar com as dependências de bibliotecas de maneira eficaz. Esta abordagem aumenta a acessibilidade da aplicação SPC, tornando-a mais robusta e fácil de usar.

6.7 Aplicações auxiliares

Para melhorar a usabilidade e funcionalidade da aplicação principal de SPC, foram desenvolvidas duas aplicações secundárias. Estas aplicações visam disponibilizar ferramentas e interfaces adicionais que agilizam a interação com o sistema SPC, tornando-o mais fácil de utilizar e eficiente para os diversos intervenientes.

6.7.1 Specification limits Changer

A primeira aplicação auxiliar foi projetada para permitir que os usuários modifiquem facilmente os limites de especificação para diferentes processos. Este aplicativo fornece uma interface simples para ajustar limites, garantindo que o sistema SPC permaneça flexível e adaptável às mudanças nos requisitos de produção e nos padrões de qualidade.

Assim como a aplicação principal, foi desenvolvida em **Python**. Esta aplicação compreende dois componentes principais: a classe **Page** e a classe **API**.

Classe Page

A classe **Page** serve como interface do usuário, utilizando **tkinter** para sua interface gráfica de usuário, igual à aplicação principal[6.6.1]. Permite que os usuários selecionem o processo para o qual desejam alterar os limites de especificação. Depois que um processo é selecionado, os limites de especificação atuais são exibidos e os usuários podem ajustar esses limites conforme necessário. Essa interface intuitiva garante que os usuários possam fazer os ajustes necessários com rapidez e precisão, mantendo a flexibilidade e a adaptabilidade do sistema SPC para atender às mudanças nos requisitos de produção e nos padrões de qualidade.

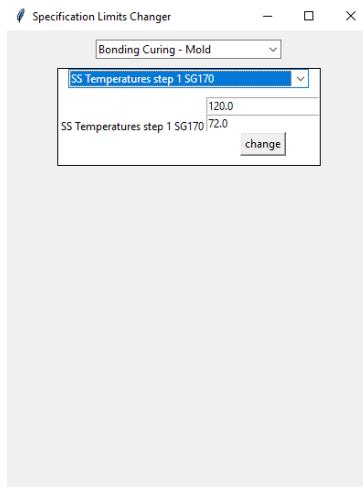


Figura 13: Mudança de limites de especificação - exemplo

Classe API

A classe **API** lida com as interações da base de dados exigidas pela aplicação. Gere *queries* para recuperar os limites de especificação atuais da base de dados e atualiza os dados com novos limites quando alterações são feitas. A classe utiliza a biblioteca **pyodbc**, semelhante à aplicação SPC principal [6.6.1], para facilitar a comunicação eficiente e segura com a bd. Essa separação de preocupações garante que a interface do usuário permaneça responsiva e fácil de usar, enquanto as operações de dados subjacentes são tratadas de forma eficiente e segura.

Distribuição

Assim como a SPC app, o *Specification Limits Changer* foi empacotado num executável usando **PyInstaller** [6.6.4]. Essa abordagem simplifica o processo de implantação, permitindo que os usuários executem o aplicativo sem a necessidade de instalar **Python** ou quaisquer dependências e garantindo um ambiente

consistente em diferentes sistemas.

6.7.2 SPC Web App

A segunda aplicação auxiliar trata-se de uma plataforma web projetada para fornecer uma visão geral simplificada do status de todos os processos. Construído usando **Python Flask** [20] e implementada com **Gunicorn** [21], este aplicativo permite aos usuários monitorizar o desempenho em nível macro de processos em andamento, apresentando um instantâneo rápido e abrangente da integridade e do desempenho do sistema. Ao exibir as principais métricas e status em um formato facilmente acessível, este aplicativo da web ajuda os usuários a tomar decisões informadas e a resolver prontamente quaisquer problemas que possam surgir.

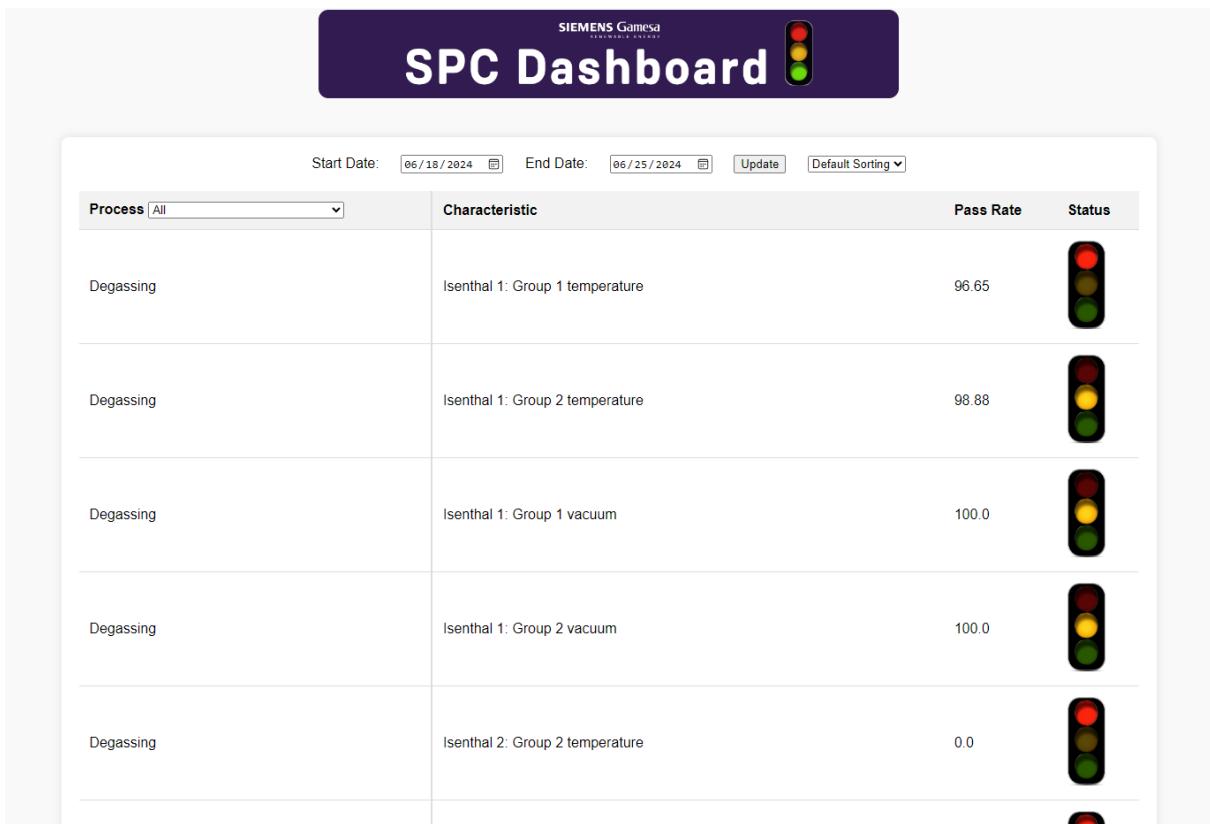


Figura 14: Página web SPC em macro

Para melhorar a eficiência, o aplicativo atualiza o status a cada 10 minutos em vez de calcular as métricas cada vez que alguém abre a página. Inicialmente, foi tentado o uso de *threading* para lidar com essa atualização periódica. No entanto, **Gunicorn** cria uma instância inteira do aplicativo para cada novo *worker*, o que resultaria na criação de uma nova *thread* para cada instância. O que pode se tornar ineficiente e consumir muitos recursos desnecessariamente.

Para evitar esse problema, foi desenvolvido um *script* separado que atualiza a base de dados SQL com o status a cada 10 minutos. Este *script* é executado de forma independente, garantindo que o aplicação permaneça eficiente e responsiva. Por defeito, o *script* atualiza os dados referentes ao intervalo de tempo da última semana. Caso o usuário precise de verificar o status em macro de um intervalo de tempo diferente a página web é capaz de fazer. No entanto, isso implica calcular todas as métricas para todos os processos dentro desse novo intervalo, o que é mais lento. Para além disso, com um *script* a correr a todo o tempo que verifica o estado do processo, já existe a base para implementar avisos no futuro.

O *script* consiste em duas partes principais: uma API e uma classe que trata do SPC. A API é responsável por gerir as requisições de atualização de status, enquanto a classe SPC realiza o cálculo e a análise dos dados coletados, gerando as métricas necessárias para a monitorização contínua dos processos.

Ambos, a página web e o *script* de atualização, são executados num contentor na NAS, aproveitando os recursos de gerência de contentores da NAS para garantir uma implementação robusta e escalável. A escolha de usar contentores proporciona flexibilidade e isolamento de ambiente, garantindo que as atualizações de status sejam realizadas de maneira eficiente e segura.

Um dos desafios enfrentados foi a integração com a base de dados. Inicialmente, foi considerado o uso da biblioteca **pyodbc** como nos casos anteriores. No entanto, o requisito de drivers do Windows [6.6.1] trouxe problemas de compatibilidade com o contentor na NAS, uma vez que a NAS geralmente opera em ambientes baseados em Linux. Para contornar essa limitação, foi utilizada a biblioteca **pymssql**, que é compatível com ambientes Linux e funciona de forma eficiente para se comunicar com bases de dados SQL Server. A biblioteca permite realizar operações de leitura e escrita na base de dados sem a necessidade dos drivers do Windows, garantindo que o ambiente funcione sem problemas.

6.7.3 Resumo

Estas aplicações auxiliares não só melhoraram a funcionalidade geral do sistema SPC, mas também melhoraram o envolvimento do utilizador, fornecendo ferramentas intuitivas para gerir e monitorizar os processos. O *Specification Limits Changer* simplifica o processo de ajuste dos limites de especificação, garantindo flexibilidade e adaptabilidade na produção. O aplicativo *SPC Web App* oferece uma visão geral abrangente e em tempo real do desempenho do processo, facilitando a tomada de decisões oportuna e informada. Juntas, estas aplicações contribuem significativamente para a eficiência e eficácia do sistema SPC, demonstrando o valor das ferramentas suplementares no aprimoramento das capacidades do sistema primário.

6.8 Conclusão

O capítulo de desenvolvimento do projeto abrange a jornada de criação de um sistema robusto e eficiente de Controlo Estatístico de Processo (SPC). Cada etapa desta jornada, desde a conectividade da máquina até o desenvolvimento de aplicações secundárias, foi meticulosamente planeada e executada para garantir uma solução perfeita e integrada.

A base do projeto foi estabelecida através da conectividade das máquinas, um componente crítico alcançado com a tecnologia na Siemens. Essa conectividade permitiu a coleta confiável e contínua de dados de diversas máquinas, formando a espinha dorsal do nosso sistema SPC. Garantir que as máquinas estejam interconectadas e capazes de transmitir dados é vital para a monitorização e análise em tempo real, estabelecendo as bases para processos subsequentes.

A criação e manutenção da base de dados SQL foi outro aspecto fundamental. Aproveitar uma NAS para seus recursos de gerência de contentores proporcionou um ambiente escalável e seguro para as necessidades de armazenamento de dados. A utilização de uma base de dados **MSSQL** na NAS garantiu alto desempenho e confiabilidade. Esta infraestrutura foi essencial para armazenar e gerir as grandes quantidades de dados recolhidos, permitindo a recuperação e manipulação eficiente dos dados.

O levantamento de dados através do **Node-RED** facilitou o fluxo contínuo de informações das máquinas para a base de dados. A capacidade do **Node-RED** de importar nós para conectividade de máquinas e suas funcionalidades de transformação de dados foram essenciais para o processo ETL, otimizando a gerência de dados e reduzindo o tamanho na base de dados.

O processo de migração de dados, implementado em **Python**, foi uma etapa crucial na transição de uma base de dados *Time-Series* para uma SQL. Ao utilizar bibliotecas **Python** para conectar a ambas as bases de dados, foi garantida a consulta e transferência de dados precisa e eficiente. Esta migração permitiu uma utilização mais eficaz dos dados na aplicação SPC, melhorando o seu desempenho e usabilidade.

O desenvolvimento da aplicação SPC principal foi um marco significativo. Com sua interface amigável e de fácil interpretação assim como as várias opções de interação, forneceu-se uma solução abrangente para monitorizar e controlar processos de produção. O formato executável simplificou a implantação e garantiu um ambiente consistente para todos os usuários, aumentando a facilidade de uso do aplicativo.

As aplicações secundárias enriqueceram ainda mais o sistema SPC. O *Specification Limits Changer* permitiu aos usuários ajustar os limites de especificação sem esforço, garantindo a flexibilidade do sistema e a *SPC Web App* forneceu uma visão geral em tempo real de todos os processos.

Concluindo, o capítulo de desenvolvimento do projeto ilustra um esforço bem coordenado para construir um sistema sofisticado de SPC. Desde o estabelecimento da conectividade das máquinas até o desenvolvimento de aplicações primárias e secundárias, cada fase foi executada com precisão para criar uma solução coesa e eficiente. Esta abordagem abrangente não só garantiu a robustez do sistema SPC, mas também melhorou significativamente a sua usabilidade e funcionalidade, demonstrando a integração bem sucedida de várias tecnologias e metodologias.

Capítulo 7

Aplicação do projeto

7.1 Introdução

O desenvolvimento do sistema SPC num ambiente industrial colocou desafios únicos, principalmente devido ao envolvimento de um grande número de partes interessadas. Trabalhar com um grupo diversificado de engenheiros de processo, técnicos e pessoal de produção exigiu coordenação e comunicação cuidadosas para garantir que o projeto atingisse seus objetivos de forma eficaz.

Um dos principais desafios foi alinhar as diversas expectativas e requisitos dos diferentes departamentos, cada um dos quais com necessidades e prioridades distintas. Para resolver isso, o projeto começou com o desenvolvimento da aplicação principal como prova de conceito para alguns processos selecionados. Esta versão inicial foi apresentada aos engenheiros de processo para coletar *feedback* valioso e avaliar seu impacto potencial na área de produção.

Para garantir o correto desenvolvimento do projeto, foi adotada uma abordagem estruturada, que incluiu as seguintes etapas:

- Reuniões semanais para *feedback* e melhorias
- Desenvolvimento e teste iterativos
- Implementação e monitorização diária

Esta abordagem estruturada, que envolve *feedback* regular, desenvolvimento iterativo e monitorização constante, foi essencial para superar os desafios de trabalhar num grande ambiente industrial. Ao envolver-se ativamente com as partes interessadas ao longo do processo de desenvolvimento, o projeto foi capaz de fornecer uma solução que fosse eficaz e alinhada com as diversas necessidades dos seus utilizadores.

7.2 Reuniões semanais

Reuniões semanais (Metodologia Agile [4.1.2](#)) desempenharam um papel crucial no sucesso do desenvolvimento e implementação do sistema SPC. Essas reuniões foram projetadas para promover a colaboração e facilitar uma compreensão abrangente das necessidades e expectativas das diversas partes interessadas envolvidas no processo de fabrico. Ao reunir engenheiros de processo, técnicos e outras pessoas-chave, as reuniões tornaram-se uma plataforma para troca de ideias, identificação de necessidades críticas e garantia do alinhamento do projeto com os requisitos do mundo real.

Um dos principais benefícios das reuniões semanais foi a capacidade de compreender quais processos críticos precisavam ser incluídos no sistema SPC. Cada departamento de produção tinha o seu conjunto único de prioridades e desafios, e estas reuniões forneceram informações valiosas sobre quais os processos mais vitais para alcançar um controlo de produção eficiente. Ao identificar esses processos essenciais, foi possível priorizar sua implementação na aplicação, garantindo que a implantação inicial do sistema abordasse as áreas de maior impacto. Como resultado disso, foi criada uma lista com todos os processos e características que necessitavam de ser implementadas.

Outro aspecto significativo que emergiu das reuniões foi a necessidade de melhorias específicas na experiência e funcionalidade do usuário. As discussões destacaram a importância de certos recursos, como permitir que os usuários adicionem comentários para eventos ou anomalias de produção específicas, o que forneceu contexto e *insights* para análises futuras. Da mesma forma, a capacidade de alterar os limites de especificação dentro da aplicação foi reconhecida como um recurso vital, permitindo que os engenheiros se adaptassem rapidamente às mudanças nos requisitos de produção ou nos padrões de qualidade. Além disso, foi identificada a necessidade de visualizar todos os processos em nível macro, levando ao desenvolvimento da Aplicação *SPC Web App*, que oferecia uma visão geral em tempo real de todo o ambiente de produção.

Além de descobrir funcionalidades críticas, as reuniões semanais serviram como um local valioso para fazer *debug* da aplicação e identificar problemas precoces nos processos já implementados. À medida que os usuários começaram a interagir com a versão inicial do aplicativo, foram encontrados vários problemas e áreas em que o sistema não funcionava conforme o esperado. Estas reuniões proporcionaram uma oportunidade para os interessados reportarem tais questões, permitindo a sua abordagem prontamente. Essa abordagem proativa para a solução de problemas minimizou o tempo de inatividade e garantiu que o aplicativo melhorasse continuamente para atender às crescentes necessidades de seus usuários.

No geral, as reuniões semanais foram fundamentais para transformar o sistema SPC num aplicativo

robusto e centrado no usuário. Facilitaram uma compreensão mais profunda dos processos de fabrico, destacaram áreas de melhoria e promoveram um ambiente colaborativo onde o *feedback* foi ativamente buscado e implementado. Esse ciclo contínuo foi essencial para o desenvolvimento de um projeto que realmente ressoasse com os usuários, tornando as reuniões semanais um aspecto indispensável para o sucesso do projeto.

7.3 Desenvolvimento e teste iterativos

O processo iterativo de desenvolvimento e teste foi a base do sucesso do sistema SPC, permitindo a melhoria contínua da aplicação para atender às necessidades específicas dos seus usuários. Essa abordagem enfatizou o progresso incremental, testes frequentes e *feedback* do usuário, criando um ciclo dinâmico que permitiu o refinamento e a adaptação contínuos do software.

Uma das principais vantagens do desenvolvimento iterativo foi a capacidade de incorporar rapidamente o *feedback* do usuário das reuniões semanais no aplicativo. À medida que novos requisitos e processos críticos fossem identificados, eles poderiam ser integrados ao sistema em incrementos geráveis. Essa flexibilidade garantiu que os recursos mais urgentes e impactantes, como funcionalidades de comentários, ajustes de limites de especificações e visualizações de processos em nível macro, fossem priorizados e desenvolvidos de forma eficiente. Foi assim possível responder rapidamente ao *feedback*, implementando mudanças alinhadas às necessidades reais do ambiente de produção.

O processo iterativo também forneceu uma estrutura robusta para testar a aplicação em vários estágios de seu desenvolvimento. Em vez de esperar até que todo o sistema fosse construído para começar os testes, foram realizadas avaliações regulares de cada novo recurso e modificação à medida que eram implementados. Esses testes frequentes permitiram a deteção e resolução precoce de problemas, reduzindo significativamente o risco de falhas críticas na implantação. Ao identificar bugs e gargalos de desempenho nos estágios iniciais, foi possível garantir a estabilidade e confiança do sistema muito antes deste chegar à fábrica.

Outro aspecto importante do desenvolvimento iterativo foi seu papel no ajuste da experiência do usuário. À medida que os usuários interagiam com a aplicação em evolução, eram destacados desafios de usabilidade e feitas sugestões melhorias. Assim foi aprimorada continuamente a interface do usuário e os fluxos de trabalho, tornando o aplicativo mais intuitivo e fácil de usar. Este processo foi crucial para garantir que o sistema SPC não apenas atendesse aos requisitos técnicos, mas também proporcionasse uma experiência de usuário perfeita e eficiente para engenheiros e operadores.

O ciclo de desenvolvimento iterativo também facilitou a comunicação regular entre as partes interessadas, promovendo um ambiente colaborativo onde a transparência e a responsabilização foram priorizadas. Ao manter as partes interessadas informadas sobre o progresso e as atualizações, foi mantida a confiança e garantida que todos os envolvidos no projeto tivessem uma compreensão clara das capacidades e limitações do sistema.

Concluindo, o processo iterativo de desenvolvimento e teste desempenhou um papel essencial na criação de um sistema SPC de alta qualidade, adaptado às necessidades específicas do ambiente de fabrico. Ao enfatizar melhorias incrementais, testes frequentes e *feedback* contínuo dos usuários, foi entregue um projeto robusto e centrado no usuário. Esta abordagem não apenas minimizou os riscos e garantiu a estabilidade do sistema, mas também capacitou os usuários a terem um impacto direto no produto final, tornando o desenvolvimento iterativo um elemento crítico para o sucesso do projeto.

7.4 Implementação e monitorização diária

A fase de Implementação e monitorização diária foi crucial para garantir a implementação bem-sucedida e a operação sustentada do sistema SPC no chão de fábrica. Esta fase marcou a transição do desenvolvimento e teste para a aplicação no mundo real, onde a eficácia e fiabilidade do sistema foram postas à prova. A Implementação do aplicativo exigiu planeamento e coordenação cuidadosos para minimizar interrupções e maximizar seu impacto nos processos de produção.

Um dos seus desafios significativos foi gerir a transição de um ambiente de testes para o local de produção real. Para facilitar uma implementação tranquila, trabalhou-se em estreita colaboração com os engenheiros de produção para garantir que o aplicativo fosse integrado perfeitamente aos fluxos de trabalho existentes. As reuniões semanais passaram a ser formações abrangentes para familiarizar os utilizadores com as características e funcionalidades do sistema, enfatizando como este poderia melhorar as suas operações diárias. Ao dotar os utilizadores com as competências e conhecimentos necessários, foi garantido que a aplicação não só fosse implementada, mas também utilizada de forma eficaz desde o início.

Para aumentar a visibilidade e acessibilidade do sistema SPC, foi instalada uma televisão na fábrica, a correr a aplicação SPC em tempo real. Este foi um aspeto fundamental da estratégia de implementação, proporcionando aos operadores e engenheiros acesso imediato aos dados do SPC diretamente no local onde trabalhavam. A televisão não apenas exibia o aplicativo SPC, mas também apresentava um painel Grafana, que apresentava visualizações de dados em tempo real para complementar os *insights* do SPC.

Esta combinação de ferramentas ofereceu uma visão abrangente dos processos de fabrico, permitindo a rápida tomada de decisões e a gerência proativa de possíveis problemas.

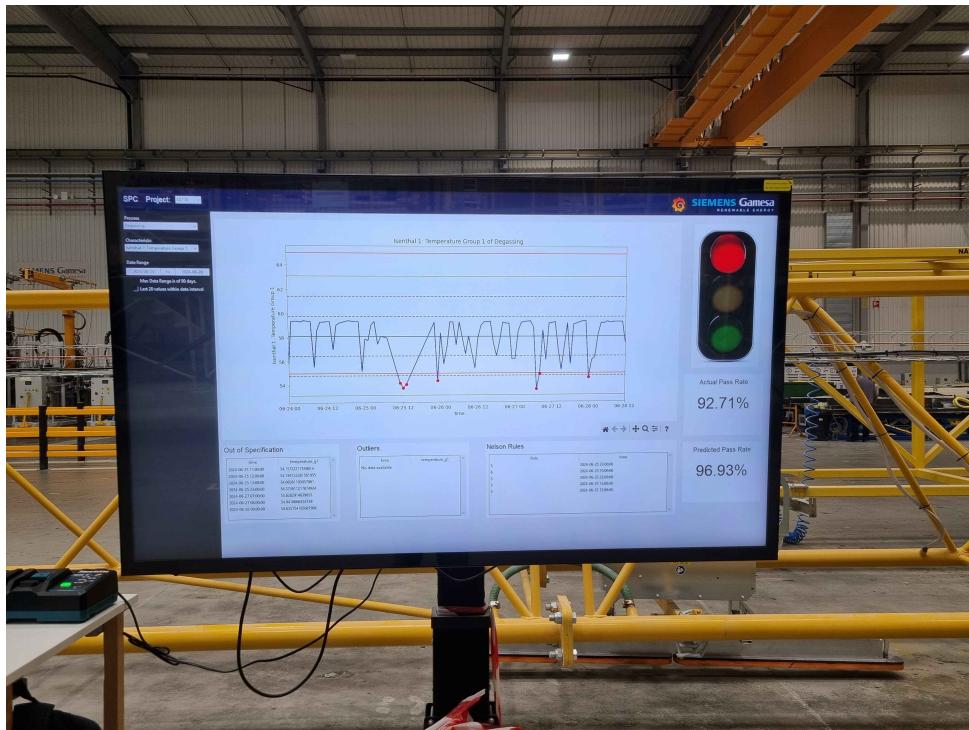


Figura 15: TV no chão de fábrica

A monitorização diária tornou-se um aspecto crítico desta fase, servindo como um ciclo contínuo de *feedback* para acompanhar o desempenho do sistema e identificar quaisquer problemas que possam surgir. Foram realizadas verificações regulares para avaliar o funcionamento do aplicativo no ambiente real, permitindo a rápida deteção e solução de problemas. Esta abordagem proativa ajudou a manter a estabilidade e a fiabilidade do sistema, reduzindo o risco de interrupções imprevistas que poderiam impactar a produção.

Este processo também forneceu informações valiosas sobre a forma como o sistema estava a ser utilizado no terreno. Ao analisar as interações dos usuários e os dados operacionais, foi possível identificar padrões e tendências que indicavam áreas para melhorias adicionais. Por exemplo, se um recurso específico era usado com frequência ou causava confusão, era então destacada uma oportunidade de refinamento e aprimoramento. Essa avaliação contínua permitiu a iteração continua no aplicativo, tornando-o mais intuitivo e alinhado às necessidades do usuário.

Outro benefício importante foi a capacidade de responder prontamente ao *feedback* da área de produção. À medida que operadores e engenheiros relatavam problemas ou sugeriam melhorias, era possível implementar rapidamente alterações e atualizações para resolver essas preocupações. Esta capacidade

de resposta ajudou a criar confiança entre os utilizadores, reforçando o seu envolvimento com o sistema e garantindo o seu sucesso contínuo.

Além de melhorar a satisfação dos usuários, a monitorização diária desempenhou um papel vital na manutenção da saúde técnica do sistema. Verificações regulares da integridade dos dados, métricas de desempenho e tempo de atividade do sistema garantiram que o aplicativo permanecesse robusto e capaz de lidar com as necessidades de um ambiente de produção dinâmico. Essa vigilância minimizou o tempo de inatividade e garantiu que quaisquer problemas potenciais fossem resolvidos antes que pudessem se transformar em problemas graves.

Em suma, a fase de implementação e monitorização diária foi fundamental para estabelecer o sistema SPC como uma ferramenta confiável e eficaz para controlo estatístico de processos. Ao gerir cuidadosamente a implementação e manter uma supervisão cuidadosa do seu desempenho, foi garantido que o aplicativo cumprisse sua promessa de melhorar a eficiência e a qualidade da produção. Esta fase não consistiu apenas em implementar o sistema, mas em incorporá-lo na estrutura do processo de fabrico, tornando-o parte integrante das operações diárias. O uso de uma tela de televisão solidificou ainda mais a presença do sistema no chão de fábrica, garantindo que os *insights* em tempo real estivessem sempre disponíveis para quem mais precisava deles.

7.5 Resultados obtidos

O desenvolvimento do sistema SPC trouxe melhorias significativas na gestão e controlo dos processos de fabrico. O aplicativo demonstrou capacidade de executar três funções principais: deteção, previsão e avaliação. Essas funcionalidades melhoraram coletivamente a capacidade de monitorizar, analisar e melhorar os processos de produção, levando ao aumento da eficiência e da qualidade no ambiente de fabrico.

Uma das conquistas mais destacadas do sistema é a sua capacidade de detetar processos que estão fora de controlo. Esta função permite que operadores e engenheiros identifiquem prontamente desvios no comportamento esperado do processo, permitindo a tomada rápida de ações corretivas. Ao monitorizar continuamente os parâmetros do processo e alertar os usuários sobre anomalias, o sistema garante que a produção permaneça dentro dos limites de controlo desejados, reduzindo assim o risco de defeitos e minimizando o desperdício. Um exemplo de um processo que foi detetado inicialmente pelo SPC apresenta resultados promissores após a alerta do caso e a devida correção.



(a) Processo detetado

(b) Processo após correções

Figura 16: Exemplo de deteção

Neste caso, a deteção do processo fora de controlo resultou em melhorias significativas. Após serem alertados, os responsáveis realizaram a manutenção necessária, o que trouxe o processo para um estado muito mais estável.

Além da deteção, o sistema SPC aproveita as *Nelson Rules* para fornecer capacidades preditivas. Ao analisar padrões e tendências de dados, a aplicação pode prever potenciais problemas antes que se tornem críticos, permitindo intervenções proativas. Esta análise preditiva é particularmente benéfica para antecipar problemas, prevenir tempos de inatividade e otimizar a alocação de recursos. Ao prever tendências e possíveis desvios do processo, o sistema permite que os engenheiros mantenham condições de produção ideais e melhorem a eficiência geral. Esta parte requer atenção especial devido à sua imaturidade, estudar outros métodos de previsão para além das *Nelson Rules* pode ser importante para alcançar um sistema que melhor se enquadra ao problema de previsão.

Para além disso, é também de destacar a sua função de avaliação, que avalia a taxa de aprovação prevista dos processos. Esse recurso funciona de forma semelhante a um sistema de notas escolares, fornecendo uma medida clara e quantificável do desempenho do processo. Ao calcular a probabilidade de um processo atender às suas especificações e padrões de qualidade, a aplicação oferece informações valiosas sobre a capacidade do processo. Essa avaliação ajuda os engenheiros a tomar decisões informadas sobre ajustes de processos, controlo de qualidade e otimização de recursos, levando, em última análise, à melhoria da qualidade do produto e à satisfação do cliente.

A combinação de deteção, previsão e avaliação dentro do sistema SPC resultou num processo de fabrico mais controlado e eficiente. Os *insights* em tempo real fornecidos pelo sistema levaram a uma tomada de decisão mais rápida e a uma abordagem mais proativa à gerência de processos.

No geral, a implementação do sistema SPC provou ser um recurso valioso para o processo de fabrico, proporcionando melhorias tangíveis no controle e na eficiência do processo. Ao permitir uma melhor deteção de anomalias de processos, fornecer *insights* preditivos com as *Nelson Rules* e oferecer avaliações

abrangentes de desempenho de processos, o sistema melhorou significativamente a forma como a produção é gerida. Esta integração de análises avançadas e monitorização em tempo real não é capaz de melhorar a eficiência operacional, mas também contribuir para alcançar padrões de qualidade mais elevados e satisfação do cliente.

Capítulo 8

Conclusões e trabalho futuro

8.1 Conclusões

Concluindo, o desenvolvimento e a implementação do sistema SPC melhoraram significativamente os processos de fabrico por meio da aplicação estratégica de levantamento de dados, análise e monitorização em tempo real. Desde o estabelecimento de conectividade robusta de máquinas na Siemens até a implementação de mecanismos avançados de coleta de dados usando Node-RED, cada etapa foimeticulosa e executada. Isto estabeleceu uma base sólida para todo o projeto, garantindo que o sistema pudesse reunir e processar com eficiência as grandes quantidades de dados necessários para um controlo estatístico eficaz do processo.

O projeto começou aproveitando os recursos de conectividade de máquinas da Siemens para garantir o levantamento confiável de dados, uma etapa fundamental e crucial para análises estatísticas precisas. Esta fase inicial destacou a importância da recolha de dados de alta qualidade, que servem de espinha dorsal para qualquer sistema de controlo de processos. Ao implementar uma rede sofisticada utilizando a tecnologia existente na Siemens, o projeto garantiu que a mineração de dados fosse eficiente, confiável e capaz de suportar os objetivos mais amplos da aplicação SPC.

A decisão de empregar o Node-RED para o levantamento de dados marcou um avanço significativo na arquitetura do projeto. O ambiente de programação visual do Node-RED forneceu uma plataforma intuitiva para captura de dados em tempo real, oferecendo flexibilidade e escalabilidade. O uso do processos ETL, combinado com a migração de dados antigos para um sistema baseado em SQL, ressaltou o foco do projeto na otimização do armazenamento e recuperação de dados. Ao escolher SQL em vez de outros sistemas de base de dados, o projeto aproveitou sua capacidade de realizar consultas e agregações complexas, o que é vital para uma análise abrangente do processo. Além disso, a utilização de uma base de dados MSSQL hospedado numa NAS, equipado com um *container manager*, proporcionou uma solução robusta para lidar com grandes conjuntos de dados com alta disponibilidade e segurança.

O desenvolvimento iterativo e o teste da aplicação principal em **Python** permitiram o refinamento e a melhoria contínua. Esta abordagem, aliada às reuniões semanais com as partes interessadas, garantiu que o sistema evoluísse em resposta aos comentários e requisitos do mundo real. A inclusão de recursos importantes, como monitorização em tempo real, comentários e ajustes de limites de especificações, demonstrou o compromisso do projeto em fornecer um aplicativo centrado no usuário que atenda às necessidades do ambiente de fábrica.

A implementação da aplicação SPC, apoiada por uma tela de TV na fábrica, enfatizou ainda mais o impacto prático do projeto. Ao integrar o sistema SPC com um painel Grafana, o projeto forneceu uma visão abrangente dos dados de produção, permitindo que os operadores tomassem decisões informadas com rapidez. O processo de monitorização diária foi fundamental para manter a estabilidade do sistema e garantir que quaisquer problemas fossem prontamente resolvidos, reforçando a fiabilidade e eficácia da aplicação.

Os resultados do sistema SPC foram profundos. Suas capacidades na deteção de processos fora de controlo, na possível previsão de problemas usando as *Nelson Rules* e na avaliação do desempenho do processo por meio de taxas de aprovação previstas contribuíram significativamente para melhorar a eficiência e a qualidade da fabricação. O uso do sistema mesmo nas fases iniciais já levou a melhorias em determinados processos [7.5], assim como na deteção de valores fora de controlo em características críticas.

É importante destacar se as questões de investigação levantadas no início deste trabalho[1.3] foram respondidas:

- 1. Como a integração de dados de máquina pode permitir a deteção precoce de falhas?** A integração de dados de máquina em tempo real, através do sistema desenvolvido, mostrou-se eficaz na deteção precoce de falhas. Ao monitorizar continuamente os parâmetros de produção, o sistema SPC é capaz de identificar variações fora de controlo antes que estas impactem significativamente a qualidade do produto. A análise em tempo real permitiu tomar ações corretivas rapidamente, reduzindo o risco de produção defeituosa e o desperdício.
- 2. De que forma a implementação de regras como as Sigma Rules e Nelson Rules pode detectar falhas e custos desnecessários no processo de produção?** A aplicação das Sigma Rules no sistema SPC contribuiu diretamente para a deteção de falhas ao identificar tendências e anomalias nos dados de produção que indicam um possível desvio dos parâmetros normais de controlo. Esta funcionalidade ajudou a prever desvios de qualidade, permitindo a intervenção pro-ativa antes que ocorressem falhas maiores.

3. Quais os impactos da aplicação de metodologias de controle de processo na qualidade e consistência das pás eólicas?

A utilização do sistema SPC, aliada à implementação das metodologias de controlo, resultou em melhorias substanciais em processos de fabrico o que traz uma melhoria na qualidade e consistência das pás eólicas. A monitorização contínua e a capacidade de ajuste em tempo real permitiram manter a produção dentro de padrões mais rigorosos de qualidade. Isso não apenas aumenta a eficiência, mas também assegura uma maior consistência nos resultados, reforçando a confiança no processo de fabrico.

Concluindo, o sucesso do projeto SPC reside na sua abordagem inovadora, integração perfeita e foco inabalável nas necessidades do usuário. Ao aproveitar tecnologia avançada e esforços colaborativos, o sistema SPC estabeleceu um novo padrão para controlo de processos no fabrico. Este projeto não só atingiu os seus objetivos, mas também abriu caminho para futuras inovações na gestão de processos industriais, mostrando o potencial das soluções baseadas em dados para melhorar a excelência operacional. À medida que o sistema continua a evoluir, promete continuar a ser uma ferramenta vital na busca contínua pela eficiência e qualidade da produção.

8.2 Perspetiva de trabalho futuro

O sistema SPC estabeleceu uma base sólida para um melhor controlo do processo de fabrico, mas ainda existe um potencial significativo para trabalhos futuros para refinar e expandir ainda mais suas capacidades. Tal como acontece com qualquer projeto orientado para a tecnologia, a melhoria contínua é crucial para garantir que a aplicação permaneça relevante, eficiente e alinhada com a evolução das necessidades dos seus utilizadores e do ambiente de produção mais amplo. Várias áreas-chave foram identificadas para desenvolvimento futuro, cada uma prometendo melhorar a aplicação e o seu impacto nos processos de produção.

Uma das principais áreas de trabalho futuro é a melhoria contínua da aplicação principal, com foco em fornecer aos usuários formas mais intuitivas e interativas de interagir com o sistema. Melhorar a interface do usuário para torná-la mais amigável e visualmente atraente não apenas melhorará a experiência do usuário, mas também aumentará a eficácia geral do sistema. Isso inclui refinar os recursos existentes e adicionar novas funcionalidades que permitem aos usuários interagir com o aplicativo de maneiras mais significativas, como painéis personalizáveis e visualizações de dados personalizadas que atendem às preferências e necessidades individuais do usuário.

Outro caminho promissor para o desenvolvimento futuro é a adição de mais processos ao sistema

SPC para monitorização e controlo. Expandir o escopo da aplicação para incluir uma gama mais ampla de processos de fabrico aumentará sua utilidade e fornecerá uma visão geral mais abrangente de toda a operação de produção. Ao incorporar processos adicionais, o sistema pode oferecer *insights* sobre uma gama mais ampla de atividades de produção, permitindo monitorização e gerência mais eficazes do desempenho da produção em todos os níveis.

A integração de sistemas avançados de alerta, como notificações por e-mail para processos que estão fora de controle, apresenta outra oportunidade de melhoria. A implementação de alertas automatizados garantirá que os operadores e engenheiros sejam prontamente informados sobre quaisquer problemas críticos, permitindo-lhes tomar ações corretivas rápidas antes que esses problemas aumentem. Esta abordagem proativa à gerência de processos ajudará a minimizar o tempo de inatividade, reduzir defeitos e manter a qualidade da produção, aumentando ainda mais o valor do sistema para a operação de fabrico.

Também se justifica um exame mais detalhado das *Nelson Rules* e de sua eficácia na previsão de desvios de processo. Embora estas regras forneçam um quadro robusto para identificar potenciais problemas, explorar a sua eficácia em vários cenários e condições ajudará a refinar as suas capacidades preditivas. A realização de estudos detalhados para avaliar a precisão e fiabilidade das *Nelson Rules*, bem como a investigação de soluções preditivas alternativas, contribuirá para estratégias de controlo de processos mais precisas e eficazes. Essa exploração poderia levar ao desenvolvimento de modelos de previsão personalizados que melhor atendessem a ambientes e requisitos de produção específicos.

Além dessas melhorias técnicas, há potencial para integração de tecnologias avançadas, como *machine learning* e inteligência artificial, no sistema SPC. Essas tecnologias poderiam ser usadas para desenvolver modelos de análise preditiva que aproveitam dados históricos para antecipar comportamentos futuros de processos, oferecendo *insights* que vão além dos métodos tradicionais de SPC. A implementação de tais modelos permitiria uma tomada de decisões ainda mais proativa e baseada em dados, capacitando os engenheiros a otimizar processos com precisão e previsão sem precedentes.

Além disso, trabalhos futuros poderiam explorar a possibilidade de integração do sistema SPC com outras aplicações e sistemas de nível empresarial existentes na Siemens, como ERP (*Enterprise Resource Planning*) [22] e MES (*Manufacturing Execution Systems*) [23]. Esta integração permitiria a troca e coordenação contínua de dados entre diferentes aspectos da operação de fabrico da pás eólicas, criando uma plataforma unificada para a gerência e otimização abrangente de processos.

Em suma, o trabalho futuro para o sistema SPC abrange uma ampla gama de melhorias e expansões destinadas a maximizar o seu impacto nos processos de fabrico. Ao focar na melhoria contínua, adicionar novos processos, refinar capacidades preditivas e explorar a integração de tecnologias avançadas,

das, o sistema SPC pode evoluir para uma ferramenta ainda mais poderosa para controlo e gerência de processos. Estes desenvolvimentos não só garantirão a relevância e eficácia contínuas do sistema, mas também contribuirão para o objetivo mais amplo de alcançar a excelência nas operações de produção.

Capítulo 9

Planeamento

O projeto industrial para a dissertação será acompanhado por um estágio curricular com início no dia 2 de outubro de 2023 e fim no dia 30 de junho de 2024 em que será implementado todo o projeto. Após o fim do estágio os dias restantes até à submissão do documento final, serão dedicados para o aperfeiçoamento e conclusão da tese.

9.1 Atividades

Tarefa	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
Estado da Arte	•	•	•							
Migração dos dados para SQL	•	•								
Mineração dos dados através de NodeRed		•	•							
Implementação de métricas SPC			•	•	•	•				
Implementação de aplicações secundárias						•	•			
Melhorias							•	•	•	
Estágio	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
Escrita	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Tabela 3: Plano de atividades.

Bibliografia

- [1] Mojtaba Tajeri Hossein Niavand. *Statistical Control Process: A Historical Perspective*. International Journal of Science and Modern Engineering, 2014. <https://www.ijisme.org/wp-content/uploads/papers/v2i2/B0566012214.pdf>.
- [2] Peter Ping Liu. *DEMING'S STORY and FOURTEEN PRINCIPLES*. INT 4843 Statistical Quality Assurance. <https://castle.eiu.edu/pingliu/int4843/resources/Statistical.htm>.
- [3] Tolga Taner Jiju Antony, Alejandro Balbontin. *Key ingredients for the effective implementation of statistical process control*. INT 4843 Statistical Quality Assurance, 2000. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/00438020010343417/full/html>.
- [4] Kaoru Ishikawa. *What is Total Quality Control? The Japanese Way*. New Jersey: Prentice Hall, 1985.
- [5] R. Gandhinathan G. Karuppusami. *Pareto analysis of critical success factors of total quality management: A literature review and analysis*. The TQM Magazine, 2006. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/09544780610671048/full/html>.
- [6] Walter Andrew Shewhart. *Economic control of quality of manufactured product*. SEVENTH PRINTING, 1923. [https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.150272\(mode/2up](https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.150272(mode/2up)).
- [7] Lloyd S Nelson. *The Shewhart Control Chart—Tests for Special Causes*. Journal of Quality Technology, 1984. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00224065.1984.11978921>.
- [8] Toyota Motor Co. *Establishment of quality control system*. https://www.toyota-global.com/company/history_of_toyota/75years/text/taking_on_the_automotive_business/chapter2/section7/item6_a.html.
- [9] Steve Chadwick, Duncan Lee, Steven J. Meyer, and Joe Sartini. *Using Big Data in Manufacturing at Intel's Dmart Factories*. 2016. https://www.toyota-global.com/company/history_

[of_toyota/75years/text/taking_on_the_automotive_business/chapter2/section7/item6_a.html](https://www.of-toyota.com/text/taking_on_the_automotive_business/chapter2/section7/item6_a.html).

- [10] Bosch. Statistical process control – quality management in the bosch group, 2020. <https://pt.scribd.com/document/498796349/BOSCH-SPC>.
- [11] José Antônio Valle Antunes Jr Aline Dresch, Daniel Pacheco Lacerda. *Design Science Research - A Method for Science and Technology Advancement*. Springer, 2015. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-07374-3_4.
- [12] Valpadasu Hema, Sravanti Thota, S Naresh Kumar, Ch Padmaja, C. Bala Rama Krishna, and K Mahender. Scrum: An effective software development agile tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 981*, 2020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/981/2/022060>.
- [13] Akomolede Kehinde Kayode Innocent Uzougbo Onwuegbuzie, Olowojobutu Akinyemi Olanrewaju. Node-red and iot analytics: A real-time data processing and visualization platform. 2024. https://www.researchgate.net/publication/384446107_Node-RED_and_IoT_Analytics_A_Real-Time_Data_Processing_and_Visualization_Platform.
- [14] Mritunjay Kumar Ranjan, Krishna Barot, Vaishnavi Khairnar, and Vaishnavi Rawal. Python: Empowering data science applications and research. 2023. https://www.researchgate.net/publication/372960535_Python_Empowering_Data_Science_Applications_and_Research.
- [15] M Vagizov, A Potapov, K Konzhgoladze, S Stepanov, and I Martyn. Prepare and analyze taxation data using the python pandas library. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 876(1):012078, oct 2021. <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/876/1/012078>.
- [16] Yasin N. Silva, Isadora Almeida, and Michell Queiroz. Sql: From traditional databases to big data. In *Proceedings of the 47th ACM Technical Symposium on Computing Science Education*, SIGCSE '16, page 413–418, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2839509.2844560>.
- [17] Garth A Gibson and Rodney Van Meter. Network attached storage architecture. *Communications of the ACM*, 43(11):37–45, 2000. <https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/353360.353362>.

- [18] Mario F. Triola. *Elementary Statistics*. Pearson, 2022.
- [19] David Cortesi. Pyinstaller manual.
- [20] Gaspar and Jack Stouffer. *Mastering Flask Web Development: Build enterprise-grade, scalable Python web applications, Second Edition*. packt, 2018. <https://www.packtpub.com/en-us/product/mastering-flask-web-development-9781788995405>.
- [21] Benoit Chesneau. Gunicorn documentation, 2017.
- [22] THE INVESTOPEDIA TEAM. Enterprise resource planning (erp): Meaning, components, and examples. *investopedia*, 2024. <https://www.investopedia.com/terms/e/erp.asp>.
- [23] Eric Kimberling. Unpacking mes: A deep dive into manufacturing execution systems. *Linkedin*, 2023.

