

Aplicação do Controle Estatístico de Processos na Indústria de Máquinas Agrícolas: Estudo de Caso e Perspectivas para Melhoria Contínua

Application of Statistical Process Control in the Agricultural Machinery Industry: Case Study and Perspectives for Continuous Improvement

DOI 10.5281/zenodo.14941796

Wagner Costa Lachtim¹
Sarah Tanus²
Daniel Bertoli Gonçalves³

198

Resumo: Este estudo avaliou a eficácia do Controle Estatístico de Processos (CEP) na melhoria da qualidade da construção estrutural de máquinas agrícolas em uma empresa localizada no interior de São Paulo, durante o período de 2021 a 2022. A aplicação do CEP focou especialmente nos subconjuntos *Upper Frame* e *Lower Frame*, identificando e corrigindo desvios críticos no processo produtivo. A metodologia permitiu um monitoramento mais preciso da estabilidade dimensional desses subconjuntos, resultando em uma redução significativa da variabilidade e um aumento na conformidade com as especificações de qualidade. A análise dos dados coletados forneceu uma visão aprofundada das variáveis críticas envolvidas na fabricação, possibilitando a formulação de recomendações específicas para a melhoria contínua do processo. Entre as principais recomendações destacadas, a integração mais robusta da área de manutenção foi identificada como crucial para assegurar a estabilidade dos dispositivos de soldagem e dos equipamentos ao longo do tempo. O estudo também sugere a futura adoção de tecnologias avançadas, como sensores *IoT* e algoritmos de *machine learning*, para o monitoramento em tempo real e a previsão de falhas, com o objetivo de aprimorar ainda mais a eficiência e a confiabilidade do processo produtivo. Os resultados demonstram que o CEP é uma ferramenta eficaz para elevar a qualidade e a eficiência da produção de máquinas agrícolas, contribuindo para a competitividade e a sustentabilidade da indústria. As recomendações práticas fornecidas, como o desenvolvimento de protocolos detalhados e a

¹ Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais pela Universidade de Sorocaba – UNISO, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1649-5057>, e-mail: wangercosta2000@gmail.com

² Doutora em Processos Tecnológicos e Ambientais, Docente da Universidade de Sorocaba – UNISO, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5970-8392>, e-mail: sarah.tanus@prof.uniso.br

³ Doutor em Engenharia de Produção, Docente do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba – UNISO, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8418-4166>, e-mail: daniel.goncalves@prof.uniso.br

Recebido em 19/09/2024

Aprovado em: 25/02/2025

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*



análise dos custos e benefícios, visam facilitar a continuidade e expansão do uso do CEP, promovendo avanços nas práticas de controle de qualidade no setor.

Palavras-chave: Controle estatístico de processos. Máquinas agrícolas. Gestão da qualidade.

Abstract: This study evaluated the effectiveness of Statistical Process Control (SPC) in improving the quality of structural construction of agricultural machinery at a company located in the interior of São Paulo, during the period from 2021 to 2022. The application of SPC focused particularly on the Upper and Lower Frame subsets, identifying and correcting critical deviations in the production process. The methodology allowed for more precise monitoring of the dimensional stability of these subsets, resulting in a significant reduction in variability and an increase in compliance with quality specifications. The analysis of the collected data provided a deep understanding of the critical variables involved in manufacturing, enabling the formulation of specific recommendations for continuous process improvement. Among the main recommendations highlighted, a more robust integration of the maintenance area was identified as crucial for ensuring the stability of welding devices and equipment over time. The study also suggests the future adoption of advanced technologies, such as IoT sensors and machine learning algorithms, for real-time monitoring and failure prediction, aiming to further enhance the efficiency and reliability of the production process. The results demonstrate that SPC is an effective tool for elevating the quality and efficiency of agricultural machinery production, contributing to the competitiveness and sustainability of the industry. The practical recommendations provided, such as the development of detailed protocols and the analysis of costs and benefits, aim to facilitate the continued use and expansion of SPC, promoting advances in quality control practices within the sector.

Keywords: Statistical Process Control. Agricultural Machinery. Quality Management.

1 Introdução

A indústria de máquinas agrícolas desempenha um papel fundamental no aumento da eficiência das atividades agrícolas, fornecendo equipamentos e tecnologias essenciais para diversas operações no campo. Desde o início da mecanização agrícola até os mais recentes avanços tecnológicos, as máquinas agrícolas têm sido um motor de desenvolvimento para o setor, contribuindo para a produtividade global da agricultura. Este segmento industrial abrange uma ampla variedade de equipamentos, como tratores, colheitadeiras, semeadoras e pulverizadores, projetados para realizar tarefas que vão desde o preparo do solo até a colheita e o pós-colheita (Bule, 2023). Além disso, essa indústria gera oportunidades de emprego significativas nas áreas rurais, empregando milhões de pessoas em todo o mundo (Vian et al., 2013).

O avanço tecnológico contínuo na indústria de máquinas agrícolas é impulsionado pela demanda crescente por maior eficiência, precisão e sustentabilidade na produção agrícola. Inovações como agricultura de precisão, automação e sistemas de telemetria estão

transformando as operações agrícolas, permitindo que os produtores monitorem e controlem seus processos com mais eficácia, reduzindo custos e otimizando o uso de recursos naturais. No entanto, o setor também enfrenta desafios consideráveis, como as flutuações nos preços das commodities agrícolas, a volatilidade dos mercados internacionais e a necessidade de adaptação às mudanças climáticas e às regulamentações ambientais (Puthenveetil e Sappati, 2024).

Apesar dos avanços tecnológicos, a qualidade dos produtos continua sendo uma prioridade central para fabricantes, clientes e outros stakeholders. Manter a excelência na fabricação é imperativo, uma vez que a competitividade no mercado global exige padrões cada vez mais elevados de qualidade e confiabilidade (Singh et al., 2024). Defeitos e falhas nos produtos podem comprometer a reputação das empresas, gerar prejuízos financeiros significativos e até representar riscos à segurança dos usuários (Costa et al., 2023). Portanto, a implementação de medidas eficazes de controle de qualidade, como o Controle Estatístico de Processos (CEP), é essencial para garantir que os produtos atendam às especificações técnicas e às expectativas dos clientes (Yan et al., 2024).

Este trabalho, baseado em um estudo de caso realizado em uma empresa localizada no interior de São Paulo, investiga a aplicação do CEP no processo de construção estrutural de máquinas agrícolas entre 2021 e 2022. O objetivo do estudo foi identificar e corrigir desvios e variações que estavam comprometendo a qualidade final dos produtos. A pesquisa oferece uma análise detalhada do uso do CEP como ferramenta de monitoramento e controle, destacando sua capacidade de avaliar a performance do processo e propor recomendações para a melhoria contínua da produção. Além disso, sugere-se a futura integração de tecnologias avançadas, como sensores IoT e algoritmos de *machine learning*, para o monitoramento em tempo real e a previsão de falhas, melhorando ainda mais a eficiência e a confiabilidade dos processos produtivos.

2 Referencial Teórico

A Indústria Agrícola Brasileira desempenha um papel fundamental na economia do país, sendo responsável por uma parcela significativa da produção de alimentos e matérias-primas agrícolas a nível mundial. Com um vasto território e condições climáticas favoráveis, o Brasil é um dos principais produtores agrícolas do mundo, destacando-se especialmente na produção de soja, milho, café, cana-de-açúcar e carnes (Klein e Luna, 2019).

No contexto da indústria de máquinas agrícolas no Brasil, de acordo com os mesmos autores, o país possui uma base sólida de fabricantes e fornecedores que atendem tanto ao

mercado doméstico quanto ao internacional. Empresas brasileiras produzem uma variedade de equipamentos, incluindo tratores, colheitadeiras, plantadeiras, pulverizadores e outros implementos agrícolas.

O estudo de Vian et al. (2013) aborda a origem e a evolução da indústria de máquinas e implementos agrícolas, com foco em como certas empresas influenciaram a atual estrutura produtiva e de mercado. A estrutura mencionada é um "oligopólio diferenciado-concentrado mundial". Isso significa que poucas empresas dominam o mercado global, mas elas se diferenciam entre si por meio de estratégias específicas, como inovação e fidelização de clientes. Os autores destacam que o progresso técnico (inovações tecnológicas) e os ganhos de escala (redução de custos à medida que a produção aumenta) são cruciais no processo competitivo da indústria de máquinas agrícolas. Essas inovações e a capacidade de produzir em grandes quantidades a custos menores ajudam as empresas a se manterem competitivas.

Apesar do desenvolvimento e da competitividade da indústria de máquinas agrícolas no Brasil, existem alguns desafios e problemas de qualidade específicos que o setor enfrenta. Um dos principais problemas está relacionado à manutenção e à durabilidade dos equipamentos. Devido às condições adversas de trabalho, como a exposição a ambientes corrosivos, terrenos acidentados e longas horas de operação, os equipamentos agrícolas estão sujeitos a um desgaste significativo ao longo do tempo. Isso pode levar a falhas prematuras, aumentando os custos de manutenção e reduzindo a produtividade no campo (Singh et al., 2024).

A complexidade dos processos de fabricação e montagem de equipamentos agrícolas pode aumentar a probabilidade de defeitos de fabricação e inconsistências de qualidade. Isso pode resultar em problemas como peças mal ajustadas, soldas defeituosas, falhas de componentes eletrônicos e vazamentos hidráulicos, afetando a confiabilidade e a segurança dos equipamentos em operação.

Para enfrentar esses desafios e melhorar a qualidade dos produtos, as empresas da indústria de máquinas agrícolas no Brasil estão cada vez mais adotando práticas de controle de qualidade, como o Controle Estatístico de Processo (CEP) e a implementação de sistemas de gestão da qualidade certificados. Essas iniciativas visam garantir a conformidade com padrões de qualidade reconhecidos internacionalmente, aumentar a satisfação do cliente e fortalecer a posição competitiva das empresas brasileiras no mercado global de máquinas agrícolas (Gupta et al., 2023; Yan et al., 2024).

De acordo com Cobb (2024), o Controle Estatístico de Processos (CEP) é uma metodologia amplamente utilizada na gestão da qualidade em diversos setores industriais para

monitorar e controlar a estabilidade e capacidade de processos produtivos. O principal objetivo do CEP é assegurar que os processos permaneçam dentro de limites previamente definidos, permitindo a identificação e correção de variações indesejadas que possam comprometer a qualidade ao longo do tempo.

O CEP baseia-se na coleta e análise de dados estatísticos gerados diretamente do processo. Esses dados são frequentemente representados por gráficos de controle, como os gráficos de Shewhart, que permitem uma visualização clara das variações ao longo do tempo. As medições regulares, como dimensões de peças, tempo de ciclo, temperatura ou pressão, fornecem uma base sólida para o monitoramento contínuo (Bottani et al., 2023).

Existem dois tipos principais de variações que o CEP busca controlar: as variações aleatórias e as variações atribuídas a causas especiais. As variações aleatórias são normais em qualquer processo, enquanto as variações atribuídas a causas especiais indicam anomalias causadas por fatores identificáveis, como defeitos em equipamentos, falhas de matéria-prima ou erros humanos (Hansen et al., 2023). Ao identificar essas variações, as organizações podem determinar se um processo está sob controle estatístico e tomar medidas corretivas quando necessário.

Além de controlar a estabilidade, o CEP também permite avaliar a capacidade de um processo de atender às especificações dos clientes, através de índices como Cp e Cpk, como apontado por Montgomery (2019):

- a) Índice Cp: compara variabilidade do processo com os limites superiores de especificação (LSE) e limite inferior de especificação (LIE). E pode ser calculado com a equação:

$$CP = \frac{(LSE - LIE)}{6\sigma}$$

- b) Índice Cpi: compara variabilidade do processo com o LIE e pode ser calculado com a equação:

$$CPI = \frac{(\mu - LIE)}{3\sigma}$$

- c) Índice Cps: compara variabilidade do processo com o LSE e pode ser calculado com a equação:

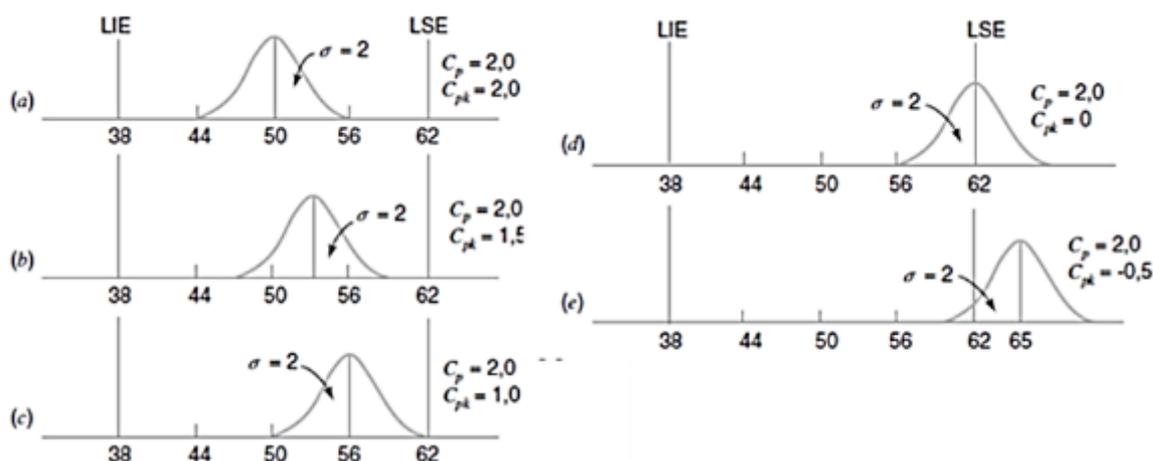
$$CPS = \frac{(LSE - \mu)}{3\sigma}$$

d) Índice Cpk: este é um índice muito utilizado, com vasta aplicação na indústria e pode ser utilizado para medir a descentralização do processo em questão. Pode-se notar que o índice Cp, também conhecido como razão da capacidade de um processo não leva em conta onde a média do processo está localizada em relação aos limites LSE e LIE. Já o índice Cpk leva em consideração esta média para ser calculado através a equação:

$$CPk = \min (Cps, Cpi)$$

É possível verificar que o Cpk nada mais é que o menor valor encontrado entre os índices Cpi e Cps. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** podemos exemplificar a diferença entre o Cpk e o Cp.

Figura 1 – Diferenças entre os índices CP e CPK



Fonte: Montgomery (2019)

Esses índices comparam a variação do processo com os limites de especificação definidos, indicando se o processo pode produzir consistentemente dentro das tolerâncias estabelecidas (Biegel et al., 2022). Um Cp elevado indica baixa variabilidade, mas o Cpk, que também considera a posição da média em relação aos limites, fornece uma visão mais detalhada da centralização do processo.

A implementação eficaz do CEP oferece às organizações uma ferramenta poderosa para melhorar a qualidade e consistência de seus produtos e serviços. O monitoramento contínuo das variações do processo reduz defeitos, aumenta a eficiência e melhora a satisfação do cliente (Reis, 2016). A análise da distribuição estatística dos dados de amostras de processos permite prever o desempenho futuro do processo. Montgomery (2019) reforça a importância de índices

como Cp, Cpk, Pp e Ppk para avaliar a variabilidade e a descentralização do processo em relação aos limites de especificação.

O Cp compara a variabilidade do processo com os limites superior (LSE) e inferior de especificação (LIE), enquanto o Cpk leva em conta a centralização do processo. Já o Pp e o Ppk são índices que avaliam a variabilidade global do processo, sendo o Ppk utilizado para identificar deslocamentos críticos (Reis, 2016):

- a) Índice Pp: compara variabilidade global do processo com os ambos os limites de especificação (LSE e LIE) e pode ser calculado com a equação a seguir.

$$Pp = \frac{(LSE - LIE)}{6s}$$
$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right)}$$

- b) Índice Ppk: O índice Ppk (variabilidade global) também é sensível a descentralizações e pode ser utilizado como alerta para identificar quando um processo está deslocado e próximo aos limites de especificação LIE e LSE.

Esses índices são essenciais para a aplicação prática do CEP em setores como a indústria de máquinas agrícolas, onde precisão e confiabilidade são cruciais para o desempenho das operações (PAIXÃO et al., 2020).

Na indústria de máquinas agrícolas, o CEP é aplicado em diversas etapas da produção, desde a seleção de materiais até a montagem final do produto. Durante a usinagem de peças metálicas, por exemplo, o CEP monitora a precisão das máquinas, garantindo que as tolerâncias dimensionais estejam de acordo com as especificações. Da mesma forma, durante a montagem de componentes, o CEP assegura a conformidade das peças e evita falhas de montagem (PAIXÃO et al., 2020).

Uma das principais vantagens do CEP é a identificação proativa de problemas de qualidade, permitindo ações corretivas antes que grandes quantidades de produtos defeituosos sejam fabricadas. Isso reduz retrabalho, desperdício e, mais importante, garante a segurança e eficiência dos equipamentos agrícolas no campo (ZERBATO et al., 2017). Além disso, o CEP promove a melhoria contínua, pois a análise constante de dados possibilita identificar tendências, corrigir causas de problemas recorrentes e implementar melhorias no processo produtivo ao longo do tempo (YAN et al., 2024).

A implementação do CEP vai além da definição de gráficos de controle; envolve a observação crítica dos fatores de sucesso e a resolução de problemas. Segundo Yan et al. (2024), a implementação completa do CEP ainda enfrenta desafios, como a necessidade de mudanças organizacionais e comportamentais. A integração entre gestores e operadores é fundamental para o sucesso do CEP, permitindo uma troca contínua de informações e desenvolvimentos simultâneos que levam à sua plena eficácia (YAN et al., 2024).

3 Metodologia

Trata-se de uma pesquisa exploratória e descritiva, de abordagem qualitativa e quantitativa (mista), que utilizou o estudo de caso como principal procedimento metodológico, permitindo uma análise detalhada e contextualizada da aplicação do Controle Estatístico de Processos (CEP) na empresa em questão. De acordo com Yin (2015), o estudo de caso é indicado para investigar fenômenos complexos em seus contextos reais, oferecendo uma compreensão profunda e abrangente do objeto de estudo. No caso desta pesquisa, o foco foi o processo produtivo de uma empresa, com a coleta de dados de fontes documentais, como registros dimensionais de controle de qualidade e relatórios das equipes envolvidas, combinada com a Observação Direta.

Embora essas abordagens tenham limitações no que diz respeito à generalização dos resultados para outros cenários, utilizou-se a técnica de triangulação de dados para aumentar a robustez das análises, conforme recomenda Gibbs (2009). A pesquisa foi estruturada em cinco etapas, começando com a análise detalhada do processo produtivo, que incluiu o mapeamento de subprocessos e a identificação de variáveis críticas, como as Funções Masters (FM), essenciais para o controle dimensional.

Na sequência, foi observada a implementação do CEP, que permitiu o monitoramento contínuo por meio de limites de controle e análises estatísticas, incluindo a avaliação da capacidade do processo com os índices CP e CPK, assegurando a conformidade com os padrões de qualidade. Finalmente, foram feitas recomendações, baseadas nas análises estatísticas e na literatura, para otimizar a fabricação e melhorar a qualidade das máquinas agrícolas.

4 Resultados e discussão

Este estudo foi conduzido no contexto fabril de uma montadora brasileira de máquinas agrícolas, que proporcionou acesso às condições de infraestrutura e documentação requeridas. Os componentes que foram objeto do estudo estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Visão geral da máquina colheitadeira com destaque para os componentes em estudo

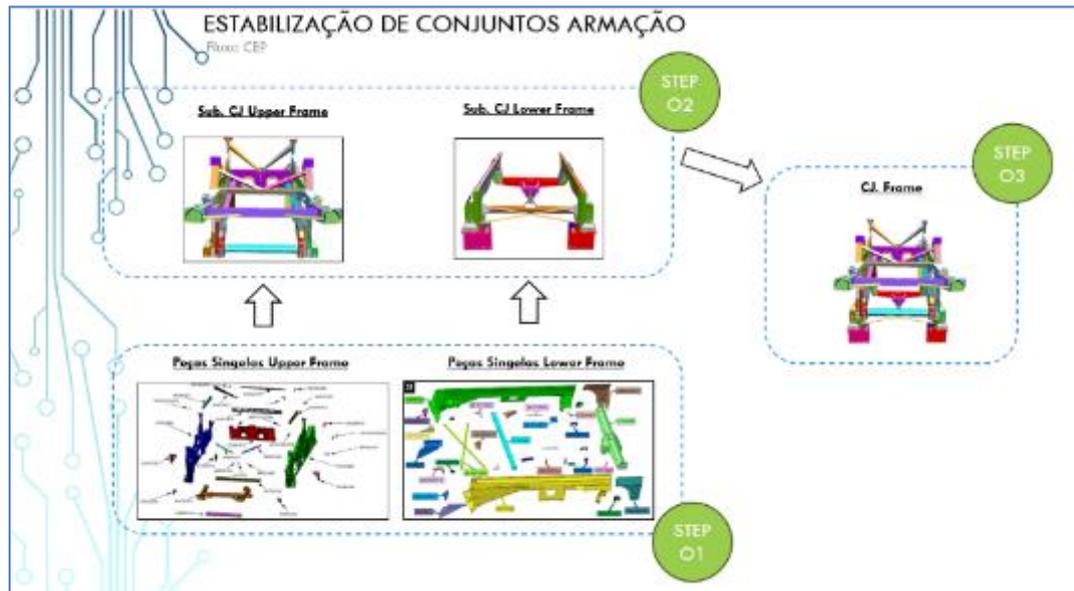


Fonte: Elaborado pelo autor

Após análise detalhada do histórico de falhas e realização de uma análise de causa raiz pelo time de Qualidade, Engenharia, Solda (armação), Corte & Dobra e Montagem, foram identificados os principais itens que compõem a máquina em uma perspectiva macro. Nesse contexto, observou-se que o conjunto *Lower Frame* e *Upper Frame* ao longo do ano completo representou 43% dos defeitos, com uma contribuição significativa para falhas relacionadas a Peneiras, Eixo dianteiro e Rotores. Essa questão foi especialmente relevante, uma vez que a montagem entre o *Upper* e *Lower* ocorria apenas na etapa final, onde já havia montagem de subcomponentes que adicionavam peso ao *Upper Frame*, ocultava os problemas. Esse “ocultamento” era devido a quantidade de peso elevada dos componentes gerando uma tensão enorme ao montar o *Lower Frame* e *Upper Frame* o que provocava alternância de medidas.

A Figura detalha os conjuntos e subconjuntos envolvidos no estudo.

Figura 3 – Fluxo geral do processo de montagem do *Lower Frame* e *Upper Frame*



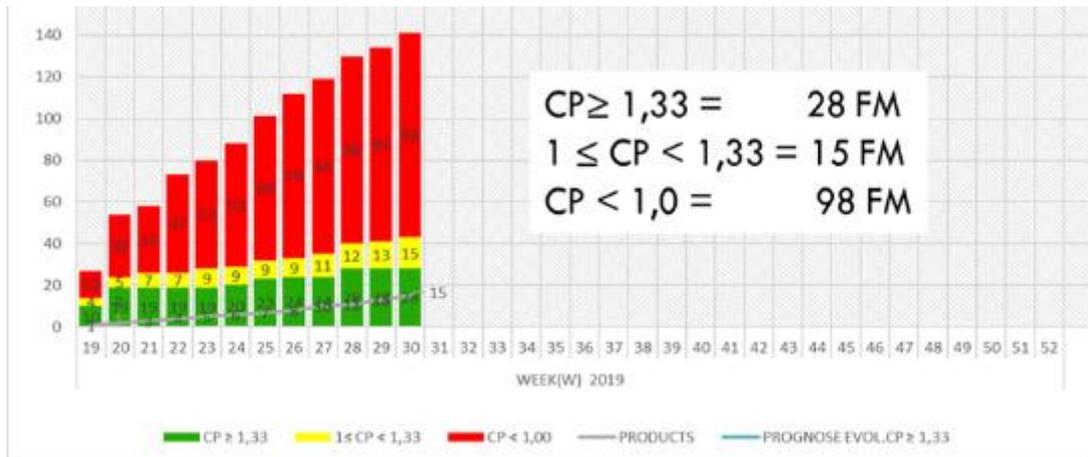
Fonte: Elaborado pelo autor

Para ilustrar a metodologia proposta, utilizou-se a sequência numérica de 01 a 03 para representar de forma simplificada a composição dos subconjuntos *Upper Frame* e *Lower Frame* que se pode nomear como o chassi superior (*Upper Frame*) e chassi inferior (*Lower Frame*) necessário para suportar os componentes que serão adicionados ao longo do processo, os quais juntos constituem a estrutura da colheitadeira (Figura 3).

O estudo teve início no departamento de Solda, onde foram estabelecidas cotas de controle, denominadas *Funktion master* ou FM. Esses pontos foram criados com base na análise das cotas de desenho e validados como referências nas montagens dos subconjuntos, em colaboração entre as áreas de Engenharia, Montagem e Fabricação (solda). Após determinar o que, como, quando e onde iniciar o monitoramento, de acordo com os requisitos da norma ISO 9001:2015, as medições foram iniciadas para compreender o processo de fabricação e verificar sua eficácia e eficiência.

As definições estabelecidas pela norma ISO 9001:2015 incluem a identificação dos principais subconjuntos, o método de dimensionamento com um *Laser Tracker* de precisão de 15 microns, garantindo a análise da maioria das tolerâncias entre $\pm 0,5$ e 5,0 mm, e a frequência inicial de análise de três conjuntos por semana. O processo teve início em 2019 com a medição dos principais subconjuntos, confirmando a inexistência de "*Funktion Masters (FM)*" com a repetitividade mínima prevista.

Figura 4 – Capacidade do processo

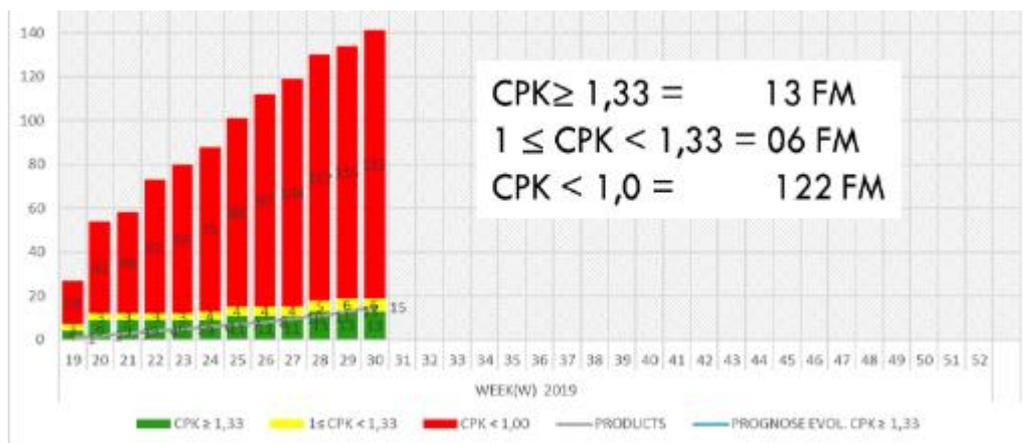


Fonte: Elaborado pelo autor

No gráfico de capacidade do processo, apresentado na Figura 4, observa-se:

- $CP \geq 1,33$: Representado em verde, indica processos que estão muito bem controlados. São 28 subconjuntos (FM - Família de Produtos) nessa categoria.
- $1 \leq CP < 1,33$: Representado em amarelo, indica processos que são aceitáveis, mas que podem ser melhorados. São 15 subconjuntos nessa categoria.
- $CP < 1,0$: Representado em vermelho, indica processos que não estão bem controlados e precisam de atenção. São 98 subconjuntos nessa categoria

Figura 5 – Capabilidade do processo



Fonte: Elaborado pelo autor

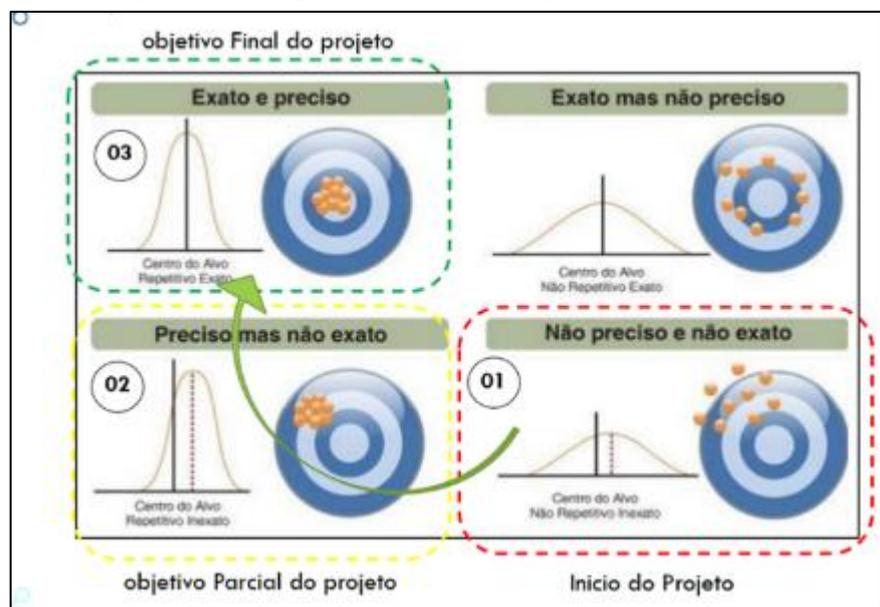
No gráfico capabilidade do processo, apresentado na figura 5, observa-se:

- $CPK \geq 1,33$: Representado em verde, indica processos ajustados que estão muito bem controlados. São 13 subconjuntos nessa categoria.

- b) $1 \leq CPK < 1,33$: Representado em amarelo, indica processos ajustados que são aceitáveis, mas que podem ser melhorados. São 6 subconjuntos nessa categoria.
- c) $CPK < 1,0$: Representado em vermelho, indica processos ajustados que não estão bem controlados e precisam de atenção. São 122 subconjuntos nessa categoria.

De acordo com Lacerda (2015) e Montgomery (2019), um processo aceitável deve ter $CP \geq 1,0$. Entretanto, um processo com 3σ é potencialmente capaz. A ideia de estabilização do processo reside em repetir uma medida mesmo que fora da tolerância e, após alcançar a estabilidade deslocar essa medida para o centro da tolerância prevista pelo desenho, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Fases para a estabilização do processo de fabricação



Fonte: adaptado de Lacerda (2015)

Após a implementação do Controle Estatístico de Processo (CEP) no Step 02 de forma robusta e eficiente, resultando em um aumento na quantidade de FM de 27 para 140 entre os anos de 2019 á 2020 mantendo a estabilidade dimensional e os FM $CP \geq 1,33$ em 36% mesmo com mais de 5 vezes a quantidade de FM descrito na Tabela 1, o aumento nas medições só foi exequível devido a compra da nova máquina tridimensional chamada Laser Tracker.

Portanto aumentou-se o número de FM (cotas) em até 5 vezes e manteve-se a estabilidade CP no mesmo nível o que foi impressionante mesmo para as previsões da equipe, que atribui essa grande melhoria ao envolvimento constante da equipe de manutenção, que anteriormente era pouco atuante, e a compra do novo equipamento de medição.

Tabela 1 – Evolução CEP (CP) – Geral

ANO		
	2019	2020
$CP \geq 1,33$	10	51
$1 \leq CP < 1,33$	4	19
$CP < 1,00$	13	70
TOTAL	27	140
CONTROLE EVOLUÇÃO CP(%)		
$CP \geq 1,33$	37%	36%
$1 \leq CP < 1,33$	15%	14%
$CP < 1,00$	48%	50%

Fonte: Elaborado pelo autor

A evolução do CPK, mostrada na Tabela 2 foi um pouco mais tímida, mas de grande impacto no processo final do produto. Aqui a cooperação da manutenção se fez essencial, pois foi preciso não só manter a repetibilidade do dispositivo foi necessário corrigir para deslocar o FM para dentro da tolerância.

Tabela 2 – Evolução CEP (CPk) – Geral

ANO		
	2019	2020
$CPK \geq 1,33$	4	36
$1 \leq CPK < 1,33$	3	31
$CPK < 1,00$	20	73
TOTAL	27	140
CONTROLE EVOLUÇÃO CP(%)		
$CPK \geq 1,33$	15%	26%
$1 \leq CPK < 1,33$	11%	22%
$CPK < 1,00$	74%	52%

Fonte: Elaborado pelo autor

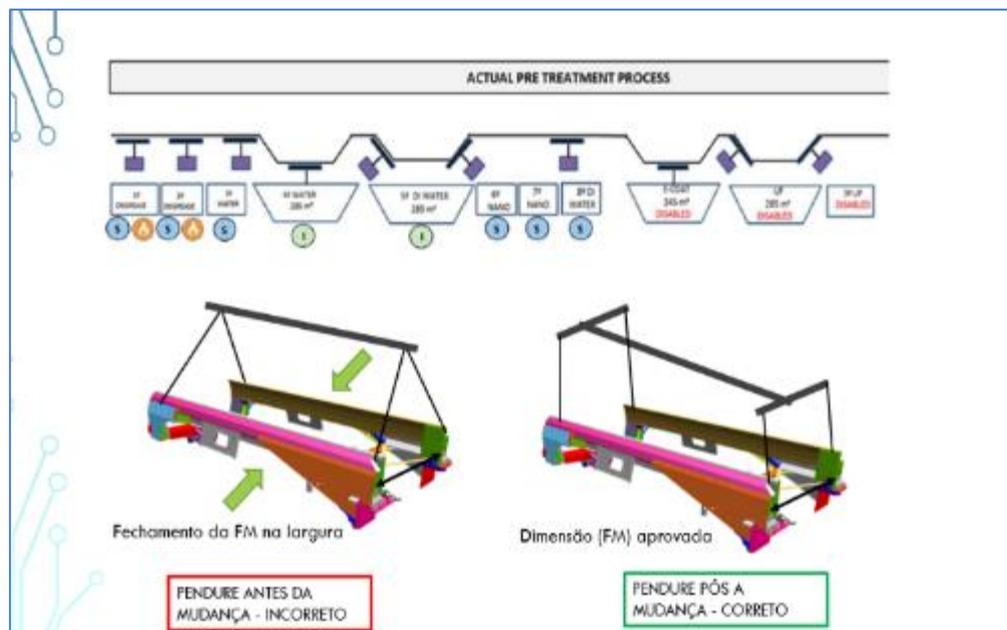
Posteriormente, foi reconhecido pelo time a necessidade de uma abordagem mais focada, optou-se por retornar ao Step 01 para os dois principais conjuntos identificados *Lower Frame* e *Upper Frame* onde foram realizadas avaliações das principais peças individuais onde o foco foi as longarinas que apresentavam torções que variavam de -5,0 á +5,5mm alterando o comportamento do *Lower Frame* no dispositivo de solda.

Ao reiniciar as medições no ano de 2021, foi observado em uma análise preliminar a necessidade de estender o nível de conhecimento do processo de fabricação em todas as etapas em que os subconjuntos receberiam adições estruturais, iniciando no recebimento da matéria-prima, seguido pela etapa de transformação do aço no setor de Corte e Dobra. As peças

individuais resultantes desse processo são então encaminhadas para a solda, onde são unidas para formar os subconjuntos. Posteriormente, os subconjuntos são enviados para a etapa de Pintura, onde passam por processos de lavagem química e pintura.

Nesse ponto o Time CEP, ao estudar o fluxo do processo, desvendou um dos principais problemas de variação estrutural em uma área pouco provável, a Pintura. Nessa área, com indicado na Figura 7, no processo de pendure, foi identificado o fechamento do *Lower Frame* devido ao peso do conjunto e a força de empuxo. Ao realizar a limpeza e o tratamento de superfície ocorria um fechamento da estrutura em que variava de 2,7 a 5,6 mm, o que contribuía com a dificuldade de ajuste entre *Upper Frame* e *Lower Frame*. Pode-se ver pela ilustração, que a modificação realizada da fixação das cintas que suportam o *Lower Frame*, passou a manter a medida dentro do especificado.

Figura 7 – Fluxo do Processo de Pintura dos conjuntos



Fonte: Elaborada pelo autor

Ao finalizar todas as modificações nos processos de construção da máquina no Corte, dobra, solda, pintura e montagem final observou-se evoluções significativas entre os anos de 2021 e 2022, indicadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e na Tabela 3. Nelas é possível observar a evolução do LF e UF no CP 2022 com 100% dos FM dentro do especificado e 87% do CPK dentro do especificado.

Tabela 3 – Evolução CP – *Lower Frame* (LF) e *Upper Frame* (UF)

ANO				
	2019	2020	2021	2022
CP \geq 1,33	1	6	8	23
1 \leq CP<1,33	1	4	4	0
CP<1,00	21	13	11	0
TOTAL	23	23	23	23
CONTROLE EVOLUÇÃO CP(%)				
CP \geq 1,33	4%	26%	35%	100%
1 \leq CP<1,33	4%	17%	17%	0%
CP<1,00	91%	57%	48%	0%

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 3 – Evolução CPK – *Lower Frame* (LF) e *Upper Frame* (UF)

ANO				
	2019	2020	2021	2022
CPK \geq 1,33	0	2	4	20
1 \leq CPK<1,33	0	5	5	0
CPK<1,00	23	16	14	3
TOTAL	23	23	23	23
CONTROLE EVOLUÇÃO CPK(%)				
CPK \geq 1,33	0%	9%	17%	87%
1 \leq CPK<1,33	0%	22%	22%	0%
CPK<1,00	100%	70%	61%	13%

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao finalizar o estudo na semana 35 de 2022, os índices de CP haviam evoluído 52% de CP < 1 para 95% de FM indicado na Tabela 5. E com CPK evoluindo de 26% CPK < 1 para 82% indicado na Tabela 6.

Tabela 4 – Evolução CP – Geral

ANO				
	2019	2020	2021	2022
CP \geq 1,33	10	51	61	81
1 \leq CP < 1,33	4	19	44	52
CP < 1,00	13	70	35	7
TOTAL	27	140	140	140
CONTROLE EVOLUÇÃO CP(%)				
CP \geq 1,33	37%	36%	44%	58%
1 \leq CP<1,33	15%	14%	31%	37%
CP<1,00	48%	50%	25%	5%

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 6 – Evolução CPK – Geral

	ANO			
	2019	2020	2021	2022
CPK \geq 1,33	4	36	45	65
$1 \leq$ CPK < 1,33	3	31	39	50
CPK < 1,00	20	73	56	25
TOTAL	27	140	140	140
CONTROLE EVOLUÇÃO CP(%)				
CPK \geq 1,33	15%	26%	80%	46%
$1 \leq$ CPK < 1,33	11%	22%	70%	36%
CPK < 1,00	74%	52%	100%	18%

Fonte: Elaborada pelo autor

Para garantir maior precisão e eficiência no controle de processos, foram implementados sistemas automatizados de coleta de dados em pontos críticos da linha de produção. As informações sobre variáveis essenciais passaram a ser coletadas de forma contínua e analisadas em tempo real. Além disso, ferramentas de software foram incorporadas para a análise desses dados, gerando gráficos de controle que orientam a tomada de decisões. Reuniões semanais de revisão foram estabelecidas para discutir os resultados e implementar ações corretivas quando necessário.

A aplicação do CEP mostrou-se eficaz na identificação e redução de variabilidades indesejadas no processo de fabricação, resultando em produtos mais consistentes e de alta qualidade. Essa prática fomentou uma cultura de melhoria contínua, incentivando as equipes a buscarem constantemente otimizações nos processos produtivos. Esse cenário corrobora as conclusões de Zerbato et al. (2017), Montgomery (2019) e Paixão et al. (2020), que destacam o impacto positivo do CEP na eficiência e qualidade industrial.

Inicialmente, a empresa buscava alinhar o estudo com a metodologia existente de CEP, porém enfrentou dificuldades devido à instabilidade do processo e à impossibilidade de coletar amostras representativas. Com medições semanais e o controle das variações dos limites de engenharia inferior (LIE) e superior (LSE), conforme proposto por Novaski (2021), foi possível atender às especificações do projeto. A aquisição de novos equipamentos permitiu a expansão das amostras e o estabelecimento de limites de controle baseados em cálculos estatísticos simples, refletindo a variação esperada entre períodos.

5 Considerações Finais

Este trabalho investigou a eficácia da aplicação do Controle Estatístico de Processos (CEP) na melhoria da qualidade do processo produtivo de construção estrutural de máquinas agrícolas, em uma empresa localizada no interior do Estado de São Paulo.

Uma das principais contribuições dessa aplicação foi a identificação das etapas críticas no processo de fabricação, especialmente nos subconjuntos *Upper Frame e Lower Frame*. O uso do CEP permitiu um monitoramento mais preciso e eficaz da estabilidade dimensional desses conjuntos, resultando em uma significativa redução na variabilidade e um aumento na conformidade com as especificações de qualidade.

A análise estatística dos dados coletados proporcionou uma compreensão aprofundada das variáveis críticas envolvidas no processo de fabricação. A partir dessa análise, foram propostas recomendações para a melhoria contínua, destacando a necessidade de maior integração da área de manutenção no processo produtivo. Isso é essencial para garantir a estabilidade dos dispositivos de soldagem e equipamentos ao longo do tempo, contribuindo para a consistência dos resultados.

Este estudo demonstrou que a implementação do CEP pode trazer melhorias substanciais na qualidade e eficiência da produção de máquinas agrícolas, tal como havia sido apontado na literatura. As recomendações práticas aqui fornecidas, como o desenvolvimento de protocolos detalhados e a análise dos custos e benefícios, visam apoiar a continuidade e expansão do uso do CEP. Ao discutir as limitações e sugerir direções para pesquisas futuras, esperamos contribuir para o avanço das práticas de controle de qualidade na indústria de máquinas agrícolas. Em última análise, a integração do CEP não só aprimora a qualidade dos produtos, mas também aumenta a competitividade e a sustentabilidade das operações industriais.

6 Financiamento e agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à Universidade de Sorocaba e à Capes pelo apoio institucional e pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa. Estendem, ainda, sua especial gratidão à empresa parceira, cuja colaboração foi essencial para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

AL-QUDAH, Sura K. A study of the AIAG measurement system analysis (MSA) method for quality control. **Journal of Management & Engineering Integration**, v. 10, n. 2, p. 68-80, 2017. Disponível

em: <https://www.proquest.com/openview/e917a8a77f590c472e82b90115529865/1?pq-origsite=gscholar&cbl=716332> . Acesso em: 08 maio 2024.

BIEGEL, Tobias et al. Deep learning for multivariate statistical in-process control in discrete manufacturing: a case study in a sheet metal forming process. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 107, p. 422-427, 2022. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827122002852?via%3Dihub> . Acesso em: 08 maio 2024.

BOTTANI, Eleonora et al. Statistical process control of assembly lines in manufacturing. **Journal Of Industrial Information Integration**, [S.L.], v. 32, p. 100435, abr. 2023. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100435. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452414X23000080?via%3Dihub> . Acesso em: 08 maio 2024.

BULE, Lucílio Alexandre. **Análise dos fatores que condicionam a adoção de variedades melhoradas de sementes pelos produtores de arroz no distrito de Chongoene em Moçambique**. 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/266156>. Acesso em: 15 junho 2024.

COBB, Barry R.. Intermittent sampling for statistical process control with the number of defectives. **Computers & Operations Research**, [S.L.], v. 161, p. 106423, jan. 2024. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.cor.2023.106423. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054823002873?via%3Dihub> . Acesso em: 08 maio 2024.

COSTA, Federica et al. Industry 4.0 digital technologies enhancing sustainability: applications and barriers from the agricultural industry in an emerging economy. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 408, p. 137208, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137208>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623013665>. Acesso em: 08 maio 2024.

GIBBS, G. **Análise de dados qualitativos**. Porto Alegre: Bookman, 2009.

GUPTA, Munish et al. Challenging Cases in Statistical Process Control for Quality Improvement in Neonatal Intensive Care. **Clinics In Perinatology**, [S.L.], v. 50, n. 2, p. 321-341, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clp.2023.02.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095510823000271>. Acesso em: 08 maio 2024.

HANSEN, Henrik Hviid et al. Statistical process control versus deep learning for power plant condition monitoring. **Computers & Chemical Engineering**, [S.L.], v. 178, p. 108391, out. 2023. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2023.108391. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098135423002612?via%3Dihub> . Acesso em: 08 maio 2024.

KLEIN, H.S.; LUNA, F.V. **Alimentando o mundo: o surgimento da moderna economia agrícola no Brasil**. Rio de Janeiro: FGV; São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2019.

LACERDA, Wagner Diogenes Vieira. **A lógica paraconsistente anotada na análise dimensional de carrocerias automotivas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Santa Cecília, Santos, 2015.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introduction to statistical quality control**. John wiley & sons, 2019.

NOVASKI, Olívio. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. Editora Blucher, 2021.

PAIXÃO, Carla S.S. et al. Statistical process control applied to monitor losses in the mechanized sugarcane harvesting. **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 473-480, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/rYgkxNMJVMfDkGgqKsnZP4K/?format=html> Acesso em: 08 maio 2024.

PUTHENVEETIL, Nithin Raj; SAPPATI, Praveen Kumar. A review of smart contract adoption in agriculture and food industry. **Computers And Electronics In Agriculture**, [S.L.], v. 223, p. 109061, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2024.109061>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169924004526>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160791X18301581?via%3Dihub> Acesso em: 08 maio 2024.

REIS, Marco S. **Estatística para a melhoria de processos**: a perspectiva seis sigma. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2016.

SINGH, Khushboo et al. Applications of multi-parameter sensing in pharmaceutical, agriculture and mineral industries using THz spectroscopy and Low-Wavenumber Raman spectroscopy. **Optics & Laser Technology**, [S.L.], v. 177, p. 111020, out. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003039922400478X>. Acesso em: 08 maio 2024.

VIAN, Carlos Eduardo de Freitas et al. Origens, evolução e tendências da indústria de máquinas agrícolas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, [S.L.], v. 51, n. 4, p. 719-744, dez. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-20032013000400006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/Yg34vGfdryDNVrRj9K3Vwhx/?lang=pt>. Acesso em: 15 jun. 2024.

YAN, Ying et al. A two-stage fault diagnosis strategy for air handling units via a backpropagation multidimensional Taylor network fitter and a novel statistical process control. **Applied Thermal Engineering**, [S.L.], v. 248, p. 123245, jul. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123245>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135943112400913X>. Acesso em: 08 maio 2024.

YIN, Robert K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ZERBATO, Cristiano et al. Statistical process control applied to mechanized peanut sowing as a function of soil texture. **Plos One**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 0180399, 24 jul. 2017. Public Library of Science (PLoS). DOI: 10.1371/journal.pone.0180399. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0180399> . Acesso em: 08 maio 2024.