



**Utilização da metodologia *lean six sigma* para melhoria de equipamentos
chillers em uma empresa metalúrgica da cidade de São Paulo**

Robson Quinello

SENAI Vila Mariana

e-mail: rquinello@yahoo.com.br

Ivo Nogueira Leal

SENAI Vila Mariana

e-mail: ivo.leal@senaisp.edu.br

* RECEBIDO em 09/08/2024. ACEITO em 20/01/2025.

Resumo

Atualmente, a gestão de utilidades nas empresas, uma subárea de Facility Management (FM), é uma atividade vital que busca constantemente melhorar o desempenho operacional por meio de equipamentos mais eficientes. O estudo teve como objetivo descrever as melhorias em equipamentos de chillers utilizando-se a metodologia Lean Six Sigma (LSS) em uma empresa metalúrgica da cidade de São Paulo. A pesquisa, de natureza exploratória, adotou um estudo de caso único com foco nos chillers do processo de anodização. Como resultado das melhorias implementadas, o tempo médio de reparo (MTTR) foi reduzido em 52,4%, o tempo médio entre falhas (MTBF) aumentou em 5,4%, e a disponibilidade dos equipamentos passou de 99,94% para 99,98%, evidenciando maior eficiência e confiabilidade dos sistemas. Devido à complexidade desses equipamentos, que sofrem influências do ambiente de instalação e do modo de operação, é crucial que o setor de manutenção mantenha atualizadas as manutenções preventivas, preditivas e rotinas. Estudos sobre o uso de ferramentas avançadas de melhoria contínua em FM são raros, mas imprescindíveis em um cenário altamente competitivo, como o da manufatura.

Palavras-chave: Sistemas de refrigeração; Inovações; *Lean Six Sigma*; Melhoria Contínua

Abstract

Currently, utility management in companies, a subarea of Facility Management (FM), is a vital activity that constantly seeks to improve operational performance through more efficient equipment. This study aimed to describe the improvements in chiller equipment using the Lean Six Sigma (LSS) methodology in a metallurgical company in São Paulo. The exploratory research adopted a single case study focusing on the chillers used in the anodizing process. As a result of the implemented improvements, the mean time to repair (MTTR) was reduced by 52.4%, the mean time between failures (MTBF) increased by 5.4%, and equipment availability improved from 99.94% to 99.98%, demonstrating greater system efficiency and reliability. Due to the complexity of this equipment, which is influenced by the installation environment and mode of operation, it is crucial that the maintenance department keeps preventive, predictive, and routine maintenance up to date. Studies on the use of advanced continuous improvement tools in FM are rare but essential in the highly competitive manufacturing landscape.

Keywords: Refrigeration Systems; Innovations; *Lean Six Sigma*; Continuous Improvement.

1. Introdução.

O conceito de Facility Management (FM) encontra sua essência no suporte às infraestruturas físicas prediais no âmbito organizacional, com o propósito primordial de atender às necessidades de qualidade, segurança e conforto dos ocupantes desses espaços. No contexto brasileiro, a formalização deste campo se desdobrou com a fundação da Associação Brasileira de Property, Workplace e Facility Management (ABRAFAC) em 2004, impulsionando a disseminação desta disciplina no mercado nacional. Antes disso, sua presença era subestimada no meio acadêmico, devido à carência de contribuições teóricas nacionais, resultando em sua emergência principalmente a partir de experiências práticas oriundas de filiais de empresas multinacionais com histórico consolidado em FM.

Uma das primeiras menções ao FM surge na década de 1970, notabilizada no periódico “Computer World”, que oferece uma explicação embrionária sobre uma nova modalidade de prestação de serviços, denominada “facilities management”. Esse termo, inicialmente sem uma definição universal, emergiu como resposta às crescentes necessidades de manutenção e gestão dos primeiros edifícios corporativos dedicados ao processamento de dados, uma inovação impulsionada pela ascensão da indústria da computação, especialmente no setor bancário dos Estados Unidos (PIAIA et al., 2022).

Com o passar das décadas, o FM expandiu seu foco para além da manutenção predial, integrando aspectos estratégicos de sustentabilidade e inovação tecnológica, principalmente após os anos 1990, quando a sustentabilidade se tornou uma prioridade nas agendas corporativas. O consumo energético elevado e a crescente produção de resíduos exigiram novas abordagens, especialmente em espaços edificadas que impactam diretamente os ecossistemas (PEARCE, 2017). Além disso, o advento da digitalização e da Indústria 4.0 trouxe consigo uma transformação fundamental, permitindo a implementação de edifícios inteligentes e sustentáveis, equipados com sistemas de monitoramento e controle otimizados (BRÖCHNER et al., 2019; NOTA et al., 2021).

No cenário industrial, equipamentos de alta demanda energética, como os chillers — sistemas responsáveis pelo resfriamento de água em processos industriais e conforto ambiental —, ganharam destaque por seu papel crucial na operação eficiente e sustentável de instalações. A busca por eficiência energética e redução de desperdícios nessas operações é cada vez mais impulsionada por metodologias estruturadas de melhoria contínua, como o Lean Six Sigma (LSS).

O LSS, uma combinação das abordagens Lean Manufacturing e Six Sigma, visa eliminar desperdícios e reduzir variabilidades nos processos, promovendo melhorias na qualidade e na eficiência operacional. Enquanto o Lean foca na eliminação de atividades que não agregam valor, o Six Sigma se concentra na redução de defeitos e variabilidade através de técnicas estatísticas (ANTONY et al., 2022). Sua aplicação em equipamentos como os chillers é particularmente relevante, pois permite identificar falhas operacionais, reduzir o consumo energético e aumentar a vida útil dos sistemas.

Assim, o presente estudo busca analisar as melhorias implementadas em chillers de uma empresa metalúrgica, localizada na cidade de São Paulo, utilizando a metodologia Lean Six Sigma. Por meio de um estudo de caso, pretende-se explorar as oportunidades e os desafios da jornada de otimização desses equipamentos, contribuindo para o conhecimento prático e teórico sobre a aplicação do LSS no contexto de Facility Management.

2. Revisão da literatura.

De acordo com Alexander (1992), o FM tem como objetivo o gerenciamento de toda infraestrutura predial, com todos os seus subprocessos e recursos de serviços para uma operação comercial, industrial entre outras. Essas operações são divididas em três níveis: o estratégico, o tático e o operacional. No nível estratégico, a função do gestor FM é garantir que todos os procedimentos sejam seguidos de acordo com os objetivos da organização. No tático, é assegurar que todos os procedimentos sejam traduzidos em requerimentos técnicos e seguidos pela esfera operacional, que objetiva assegurar o funcionamento eficaz de toda a organização.

A missão do gestor FM seria aperfeiçoar de forma contínua a qualidade no ambiente de trabalho, garantir os serviços realizados com eficácia e eficiência ao cliente externo ou interno, agregando valor e diminuindo os riscos de impedimentos no processo operacional e suas instalações. É um desafio para o gestor manter todo o processo com qualidade, realizando melhorias contínuas, reduzindo os custos e os riscos da organização e, conseqüentemente, aumentando o valor do negócio (THOMSON, 1991).

Porém, segundo Chotipanich (2004), a gestão em FM corresponde a uma cadeia de diversos serviços de instalações. Tal gestão contribui diretamente para os resultados de uma organização e para a otimização dos negócios da mesma, ou seja, é uma função-chave na gestão de serviços de apoio e do ambiente de trabalho, a curto, médio ou longos prazos, variando de acordo com cada estratégia institucional (LEE, 2002). Cada organização torna-se particular, pois funciona de forma diferente com suas instalações e estas, por sua vez, são afetadas pelos ambientes ou processos. Posto isso, a prioridade do gestor seria analisar, projetar, adequar e executar um papel estratégico para contingências. Essa adequação, para uma demanda organizacional específica, como lembrada por Atkin e Brooks (2000), é decisiva, já que pode impactar diretamente os resultados financeiros das empresas.

No Brasil, a área está ganhando mais relevância no mercado quando se analisa a recente ISO 41.001:2020: “Facility Management – requisitos com orientações para o uso e elevar o reconhecimento e a qualidade dos serviços prestados pelo FM”. Nela é possível distinguir duas subáreas: *soft service* (SS) e *hard service* (HS). SS atuando nos serviços voltados às necessidades dos usuários desses espaços como: limpeza e conservação, segurança patrimonial, recepção, materiais de escritórios, amenidades entre outros. O HS atuaria nos serviços mais relacionados às demandas estruturais, sendo eles: civis, elétricos, mecânicos, engenharias, manutenções em geral, gestão de utilidades dentre outros. Existem, contudo, divergências quanto ao escopo, pois as particularidades e as peculiaridades das organizações poderiam impactar nas configurações e formatos da área.

Dentro da dimensão HS, encontrasse a área de sistemas de refrigeração que se divide em alguns subequipamentos como ar-condicionado, câmara fria e *chillers* que têm como função manter determinado processo refrigerado de acordo com os requisitos técnicos. Na busca pela excelência operacional, faz-se necessária a utilização de metodologias e técnicas que proporcionem ganhos e eficiências desses equipamentos produtivos. Uma delas, advinda principalmente dos movimentos da qualidade dos anos de 1980, é o LSS.

2.1. Ferramentas Seis Sigma, *Lean* e a integração de ambas.

Embora não haja consenso sobre o nascimento da metodologia *Six Sigma* ou Seis Sigma (SS), em tradução livre, é na década de 1980, na empresa Motorola, que o programa de qualidade SS seria criado por Bill Smith e equipe, concebido para alcançar a qualidade máxima dos produtos da empresa. Posteriormente, na General Eletric (GE), seriam sistematizadas quatro etapas utilizadas durante a implantação de projetos de melhorias: medir, analisar, melhorar e controlar cada uma composta por um conjunto de ferramentas estatísticas e da qualidade, dando origem a metodologia *Define, Measure, Analyze, Improve, Control* (DMAIC) utilizadas nos projetos (SMITH, 2003).

O ciclo DMAIC tem sido amplamente utilizado em projetos de melhoria contínua, fornecendo uma estrutura organizada para a resolução de problemas. Recentemente, autores como Gijo et al. (2022) têm explorado a eficácia do DMAIC em diversas indústrias, enfatizando seu papel na padronização dos processos e na obtenção de resultados mensuráveis. Segundo Gupta e Jain (2023), o DMAIC proporciona uma abordagem robusta que pode ser aplicada a uma ampla gama de processos industriais, incluindo setores como manufatura e serviços. Wadhwa et al. (2022) reforçam que o DMAIC não apenas ajuda a melhorar processos em termos de qualidade, mas também desempenha um papel central na integração das operações com as metas estratégicas das organizações. Eles argumentam que o ciclo DMAIC é essencial para reduzir a variabilidade e garantir que as melhorias sejam sustentáveis, uma vez que a fase de controle proporciona continuidade nas melhorias implementadas.

Entretanto, seria na década de 1990 que, segundo Zhang et al. (2011), o SS ganharia popularidade em diversas organizações por reunir na mesma metodologia a orientação ao cliente, o engajamento da liderança, o direcionamento para melhorias contínuas, os métodos estruturados e o foco em métricas e dados.

De acordo com Chakravorty e Shah (2012) e Shankar (2009), o SS é uma metodologia estatística utilizada para melhorar o processo produtivo com qualidade e diminuição na variabilidade do processo. Lee e Wei (2009) dizem que a qualidade em SS significa apenas 3 ou 4 defeitos por 1 milhão de oportunidades, mas que para produzir níveis tão baixos de variação do processo, o investimento seria alto. Conforme Bhuiyan et al., (2006) existem diversas ferramentas da qualidade que auxiliam o SS, entre elas, o desdobramento da função de qualidade (QFD), o modo de falha e análise de efeitos (FMEA), o controle estatístico de processos (SPC) e a análise de variância (ANOVA), ou seja, o SS abarca inúmeras ferramentas estatísticas e da qualidade nas suas etapas, inclusive o Plan-Do-Check-Act (PDCA), como indicam Jones et al. (2010).

Concomitantemente ao surgimento do SS, surge a metodologia *Lean* baseada no Sistema Toyota de Produção (TPS) que emerge após a Segunda Guerra Mundial, na década de 1940, no Japão e idealizada por Taiichi Ohno (WOMACK et al., 1990; WOMACK et al. (2004); MALEYEFF et al., 2012). O sistema TPS foi adotado pelos americanos e conhecida nos países ocidentais como manufatura enxuta (AKBULUT-BAILEY et al., 2012). De acordo com Womack e Jones (2003), é uma metodologia para ajudar grandes organizações na qualidade e na quantidade correta dos seus produtos fabricados, com a diminuição de atividades sem valor agregado e diminuição de desperdícios. Seriam oito os desperdícios: movimentação, superprodução, super processamento, lead time, retrabalho e defeitos (CHAKRAVORTY e SHAH, 2012). Recentemente foram adicionados mais dois tipos de desperdícios, a subutilização da criatividade de pessoas e o desperdício ambiental (VINODH et al., 2012). O *Lean* possui algumas técnicas de melhoria e ferramentas como o sistema 5S, Kanban, mapeamento do fluxo de valor (VSM) e análise de causa e efeito (C&E) que auxiliam na implantação da metodologia (DROHOMERETSKI et al., 2013; CHEN e LYU, 2009; THOMAS et al., 2009). Mais recentemente, após a década de 2000, surge a integração natural das metodologias SS e *Lean*, buscando o melhor de cada uma (BYRNE et al., 2007).

O LSS pode ser descrito como uma metodologia focada na eliminação dos desperdícios e nas variações no processo, seguindo a estrutura DMAIC, para alcançar a satisfação do cliente em relação à qualidade, à entrega dentro do prazo estabelecido, ao custo e à melhoria dos processos. Contudo, vale reforçar que as ferramentas e técnicas utilizadas no *Lean* e no SS não foram todas inventadas nessas metodologias, mas reutilizadas e repaginadas de modo estruturado para formação de ambas. Com isso, elas podem ser pensadas como caixas ou kits de ferramentas, usadas e intercambiadas dependendo dos problemas a serem solucionados (McADAM e DONEGAN, 2003).

Para Crawford (2004), enquanto a metodologia SS é aplicada para aperfeiçoar a eficácia dos processos, o *Lean* aprimora as eficiências operacionais. Pode-se utilizá-las concomitantemente para alcançar a ideia de integração. Outra forma é implantar primeiramente o *Lean* para eliminar desperdícios e, em seguida, o SS para otimizar determinados processos.

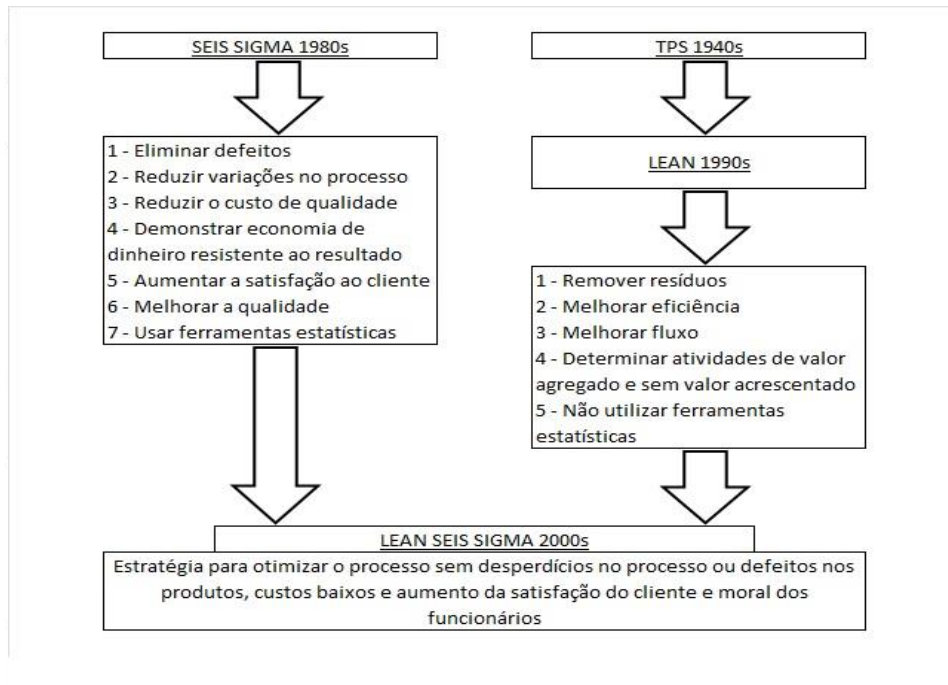


Figura 1- Integração *Lean* e *Six Sigma*. Fonte: Adaptado de Shahin e Alinavaz (2008).

Martin (2007) sugere 10 passos para elaborar o processo de solução LSS. São eles: alinhamento dos objetivos estratégicos com o projeto, garantia que as pessoas chave estejam motivadas, comunicação dos resultados, melhoria do gerenciamento de gestão, desenvolvimento do plano de melhoria, integração orientada às causas raiz, padronização dos processos, teste dos efeitos causais, treinamento por auditoria e aplicação dos controles de processos. Além desses 10 passos, são indicadas algumas outras iniciativas importantes de LSS, como incluir suporte de gerenciamento, escolher pessoas qualificadas para implantação, selecionar projetos certos e comunicar eficazmente os envolvidos.

A Figura 2 exemplifica as etapas e suas relação entre SS e *Lean* em um processo qualquer.

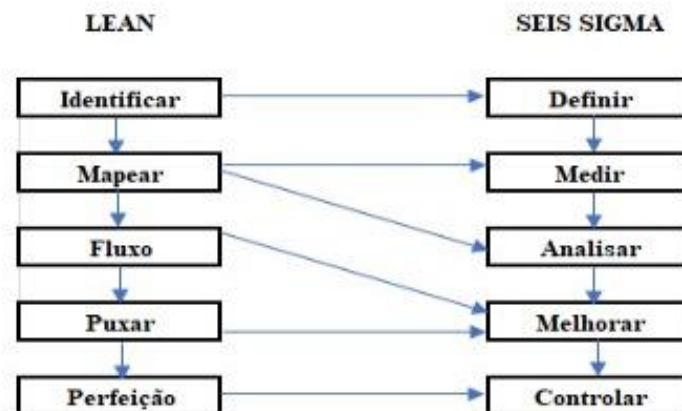


Figura 2 - Relação das etapas entre *Lean* e *Six Sigma*. Fonte: Tohidi (2012).

Embora o LSS traga benefícios para as organizações adotantes, de acordo com Albliwi et al. (2014), a falta de comprometimento e envolvimento da alta direção, de comunicação, de treinamento, entre outros, são alguns fatores que podem comprometer a implantação da metodologia. Adicionalmente, Pereira et al. (2017) alertam que apenas 10% ou menos das empresas que estão implementando as práticas do *Lean* são realmente bem-sucedidas na compreensão e na implementação da filosofia em seus processos. Parte desses obstáculos ocorre por falta de suporte tanto da alta liderança como dos times operacionais. Outro desafio é a disposição das organizações em realizar grandes investimentos na implantação e da necessidade de amplo conhecimento estatístico dos times.

São relatadas (GNANARAJ et al., 2010 e SHOKRI et al., 2022) dificuldades de pequenas e médias empresas em aplicarem metodologias de melhoria contínua como LSS em decorrência de diversas razões. Em primeiro lugar, porque ele nasceu em grandes corporações e, portanto, tem sua estrutura voltada para grandes empresas. Além disso, limitações importantes, como pouca disponibilidade de recursos financeiros e falta de apoio da liderança afetam a capacidade de pequenas e médias empresas em implementar LSS. Não obstante, há falta de um modelo sólido para que essas empresas possam superar suas deficiências e guiá-las nos passos iniciais da implementação, aliados à necessidade de grandes investimentos em treinamentos e outras mudanças, desencorajando essas empresas a iniciarem a jornada LSS.

Shokri et al. (2016), por outro lado, avaliaram a influência positiva de fatores relacionados ao comportamento humano na prontidão de pequenas e médias empresas alemãs em iniciar projetos LSS. Os fatores aferidos seriam relacionados a competências pessoais, visão estratégica das pessoas e cultura organizacional. O estudo enfatiza a importância dos elementos humanos no suporte à implementação de LSS e que o desenvolvimento de competências emocionais e intelectuais são fatores chave para isso, devendo ser aprimorados antes mesmo de iniciar o programa na empresa. Em suma, melhorar a educação e aperfeiçoar a visão dos trabalhadores podem incrementar a motivação para trabalhar com a estatística, assim como aprimorar os valores centrais da equipe também pode assegurar maior disposição para trabalhar com LSS.

De acordo com Vinodh et al. (2022), o Lean continua sendo amplamente adotado em organizações de diversos setores, com ênfase na eliminação de desperdícios e na criação de valor para o cliente. A integração das metodologias Lean e Six Sigma é vista como uma evolução natural para alcançar melhorias contínuas nos processos. Para Zhou et al. (2023), a adoção do LSS em setores industriais, como o de sistemas de refrigeração, tem proporcionado melhorias significativas na eficiência energética e na redução de custos operacionais, aspectos fundamentais para a competitividade no mercado global atual.

3. Metodologia.

A presente pesquisa, de natureza exploratória, utilizou-se de um estudo de caso único para analisar a aplicação da metodologia Lean Six Sigma (LSS) em um equipamento chiller de uma empresa metalúrgica nacional, de médio porte, situada na cidade de São Paulo. O estudo de caso foi escolhido devido ao estágio avançado da empresa na implementação de LSS e pela facilidade na obtenção de dados, já que um dos autores é funcionário da organização, facilitando o acesso às informações e à equipe de trabalho.

A empresa é pioneira na fabricação de peças estampadas em alumínio no ramo de cosméticos, possuindo grande variedade de produtos como tampas, atuadores, produtos de cuidado da pele, produtos para o lar, maquiagem entre outros. Atuando há mais de 50 anos no segmento e com certificação ISO 9001:2015, possui parceira do Instituto Brasileiro de Florestas (IBF) no sentido de realizar as compensações de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) oriundas de consumo de gás, energia elétrica e resíduos sólidos. Possui clientes como Natura, L'Oreal, Boticário, Jequití, L'Occitane Au Brésil, entre outros. Com relação às estratégias de negócios, a empresa tem seguido a visão, missão e objetivos abaixo:

- Visão: ser a líder no mercado latino-americano e reconhecida pelos clientes como a melhor empresa fornecedora de soluções inovadoras para produtos com alumínio anodizados e materiais afins.

- Missão: combinar conhecimento, arte e alta tecnologia na produção de componentes de alumínio anodizado e materiais afins, com foco no mercado de perfumaria e cosméticos, buscando a melhoria contínua dos processos e a capacitação do capital humano, assegurando inovação, flexibilidade, lead time e qualidade em produtos e serviços como diferencial de mercado, conduzindo seus negócios de forma ética e sustentável.
- Valores: integridade, respeito, responsabilidade e inovação.

O estudo de caso, conforme destacado por Yin (2005), é apropriado quando o objeto de estudo envolve eventos contemporâneos e quando o pesquisador tem pouco controle sobre as variáveis investigadas, sendo essencial a coleta de dados em um contexto de vida real. O estudo de caso oferece uma maneira de explorar em profundidade a aplicação do LSS em sistemas de refrigeração industrial e seus impactos.

A pesquisa envolveu a revisão de literatura e a coleta de dados empíricos. A revisão de literatura teve como objetivo identificar os conceitos fundamentais de LSS e sua aplicação em sistemas industriais, como chillers, fornecendo uma base teórica sólida para a análise dos dados coletados. Segundo Yin (2005), a revisão de literatura ajuda a formular as perguntas de pesquisa e a orientar a coleta de dados empíricos. Os dados foram coletados por meio de várias fontes de evidência:

- Documentação interna da empresa: relatórios operacionais e registros históricos relacionados ao desempenho dos chillers antes e depois da implementação do LSS.
- Entrevistas semiestruturadas: realizadas com a equipe de trabalho envolvida na implementação das melhorias nos chillers, composta por gestores e operadores diretamente relacionados ao projeto. As entrevistas buscaram extrair percepções sobre os benefícios e desafios encontrados durante o processo.
- Observação direta: durante o período de implementação, foram realizadas observações diretas do funcionamento dos chillers e do andamento das melhorias propostas pelo LSS. Essas observações incluíram medições de consumo energético e análise de falhas operacionais.
- Análise de artefatos físicos: foram analisados equipamentos e sistemas de monitoramento utilizados para avaliar a performance dos chillers após as melhorias implementadas.

A análise do estudo de caso seguiu a estrutura da metodologia LSS, especificamente o ciclo DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control). Para descrever e detalhar o caso, utilizou-se um quadro estruturado nas cinco etapas do DMAIC, onde as ações e melhorias realizadas em cada fase foram descritas na seção de resultados. A pesquisa buscou responder à seguinte pergunta: quais foram as melhorias implantadas nos chillers, por meio do LSS, na empresa estudada?

Essa questão norteou o levantamento de dados e a análise das melhorias aplicadas ao sistema de refrigeração, com o objetivo de identificar os impactos da implementação do LSS no desempenho operacional dos chillers e, conseqüentemente, no processo. Foram definidas as métricas: MTTR (Mean Time to Repair), MTBF (Mean Time Between Failures) e DISP. (Disponibilidade) como parâmetros de comparação.

4. Análise dos resultados.

Com o objetivo de sempre melhorar o processo, o setor de manutenção da organização realizou um projeto no setor de anodização, a partir de 2023, com o intuito de melhorar o desempenho do equipamento *chiller*, utilizando a metodologia do LSS. Para efeito de comparação foram utilizados dois momentos: coletas nos meses de fevereiro e março de 2023, ou seja, antes do projeto e dos meses de agosto e setembro, após implantação do projeto. Nesse equipamento, que trabalha ininterruptamente 24 horas por dia, são registrados os tempos em minutos de MTTR, MTBF, e a porcentagem de Disponibilidade.

O setor em questão tem como função principal do processo realizar o acabamento das peças e a pigmentação das cores de acordo com a necessidade do cliente. No setor as etapas são divididas em: processos de banho químico, anodização (tanque de carregamento), coloração e selagem. No processo banho químico é realizada a primeira etapa onde as peças ficam fixas em uma gancheira submersa dentro de um

tanque, fazendo a movimentação do cavalete por meio de um motorreductor, sendo o tanque composto por ácidos sulfúrico, nítrico e fosfórico. O aquecimento dos ácidos é realizado via sistema de resistências e a temperatura de trabalho ideal é 120°C, com tempo flexível de acordo com o modelo de peças, (as com área maior ficam por mais tempo), mas em média 3 a 8 minutos as demais peças. A finalidade desse processo é realizar o acabamento delas, nivelar o alumínio, diminuir os riscos do processo anterior que vem do setor estamparia e enganchamento. As métricas de qualidade nessa etapa do processo são: dimensional da peça, sistema passa-não passa (*Poka Yoke*) e o instrumento de medição é o paquímetro.

Após finalizar o processo banho químico, ocorre a anodização (tanque de carregamento) que possui a função de “abrir” os poros das peças. Esse é o processo mais crítico, pois a temperatura de trabalho ideal é 21°C, o tempo das peças são flexíveis de acordo com suas áreas e a pigmentação que será realizada no processo seguinte é, em média, de 15 a 90 minutos. As métricas de qualidade ocorrem por inspeção visual da peça, utilizando uma manopla de referência aprovada pelo cliente final. As variáveis nesse processo são: acidez da água, equipamento retificador e *chiller*, tempo e temperatura do tanque. O setor de laboratório faz suporte nesse processo, realizando medição duas vezes ao dia para verificar a acidez da água e suporte no nível de ácido para o processo.

O equipamento *chiller* possui suas características próprias para o processo que exerce, sendo composto por pressostatos de pressão alta e baixa, para proteção do compressor, bombas (evaporadora, condensadora e bomba química), compressor, controladores de temperatura (medição do tanque de anodização utilizando sensor PT-100 e circuito evaporadora utilizando termistor NTC), e fluxostatos na ligação hidráulica do sistema para as bombas não funcionarem sem água no sistema, pois é um circuito fechado.

O processo da pigmentação das peças segue a necessidade do cliente, podendo ser verde, preto, azul, rosa, entre outras. Nele também são utilizadas resistências para aquecimento das anilinas (cores das pigmentações para uso nas peças). A temperatura em média 90°C. A etapa de selagem é a realização da fixação da pigmentação das cores nas peças, sendo o último passo do processo no setor anodização. Ainda se utilizam resistências, com temperatura em média 90°C. Ambos os processos supracitados possuem como métrica de qualidade a inspeção visual da peça, conforme manopla aprovada pelo cliente final. Os índices de variáveis são: temperatura da selagem e PH anilina, processo acompanhado pelo setor de laboratório.

Em busca de eficiência operacional contínua, já que esse processo gera muito descarte, a empresa adotou a metodologia LSS em fevereiro de 2019 em conjunto com a consultoria Total *Lean*. Após a implantação, observaram-se melhorias gerais nos indicadores de processos-chave e a formalização de PMC's (processos de melhoria contínua), desenvolvidos pelos setores da empresa, absorvendo-se as ideias dos integrantes e transformando-as em projetos ou padronização de atividades. A empresa possui cinco pessoas com certificação SS nas categorias *green* e *black belts* (nomenclaturas utilizadas no universo do SS). São três pessoas como *green belts* (uma no setor de qualidade e duas no de manutenção) e duas como *black belts* (uma do setor de anodização e outra do de processos).

O projeto ocorreu no período de nove meses entre os dias 10 de janeiro a 10 de setembro 2023, sendo três meses de levantamento de dados e acompanhando ordens de serviço (OS) de manutenção corretiva, e seis meses realizando as melhorias e acompanhando os resultados com rotinas de manutenções preditivas e preventivas. No Quadro 1, tem-se as etapas detalhadas do projeto LSS com suas oportunidades e desafios.

Quadro 1 – Fases LSS.





DMAIC	<i>Lean</i>	Etapas	Oportunidades	Desafios
D	I	O projeto foi iniciado com a participação de quatro funcionários analistas e engenheiros durante os meses de janeiro e dezembro de 2023. Inicialmente, foram mapeados os processos e detectadas variações nas cores e acabamentos das peças (tampas de alumínio). Essa variação provocava falhas na	O time multifuncional foi capaz de identificar o gargalo e as falhas do processo por meio de treinamento da equipe que opera e a de manutenção.	Um obstáculo detectado foi a perda de conhecimentos adquiridos por rotatividade dos funcionários reduzindo a capacidade de resolução de problemas.

		pigmentação, aumento de retrabalho e produzindo custos adicionais ao processo.		
M	M	Com a implantação das manutenções preventivas, preditivas e rotinas de manutenção realizada pela equipe de manutenção, foi realizado o levantamento dos postos-chaves que afetam o processo, desde um sensor fora de aferição, como o entupimento de um trocador de calor e condensador. O nível sigma encontrado foi de aproximadamente 3,64.	A partir da identificação das falhas dos processos, foi possível manter quatro operadores por tanque de anodização, para não exceder os tempos determinado para cada peça.	A dificuldade nessa etapa relaciona-se ao processo de banho químico, pois após finalizá-lo, é necessário passar as gancheiras em tanques de água limpa para retirar o excesso de ácido e não manchar na próxima etapa.
A	F	Com base nos dados recolhidos na etapa medição, foi possível analisar e entender os motivos das falhas implantando a metodologia 5W2H, definindo-se a causa raiz do problema.	Foram definidos os tanques de carregamentos cujo modelo de peças possui o mesmo tempo ou intervalo menor, para os demais tanques realizarem o fluxo contínuo mais rápido.	As gancheiras ficavam armazenadas próximas ao tanque, ocasionando colisão nas gancheiras, e falta de espaço na área de trabalho.
I	P	Com a instalação dos manômetros no <i>chiller</i> e trocador de calor, foi possível acompanhar a melhora interna no circuito fechado do <i>chiller</i> . Com essas ações, conseguiu-se antecipar uma falha no sistema.	Manter a quantidade de gancheiras definidas no início do planejamento determinado pelo PCP, desta forma, não haverá falta ou excesso de peças paradas posteriormente em estoques.	Realizar a produção de acordo com o planejado, ter uma comunicação eficaz entre o setor produção e PCP, e dar feedbacks da produção diariamente.
C	P	Fiscalizar todas as etapas anteriores para controlar as implantações realizadas, verificar se estão sendo eficazes ao decorrer do processo, manter o procedimento de manutenção e análise de causa raiz do problema. Recalcular o novo nível sigma ao longo dos próximos meses.	Realizar todas as etapas da peça com o menor custo e mesma qualidade no processo para ser entregue ao cliente final.	Dificuldade em diminuição de horas extras e rotatividade dos colaboradores da área operacional. Há que se recalcular o novo nível sigma, verificando se os resultados são sustentáveis ao longo do tempo.





Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

No Quadro 2, seguem, em detalhes, as etapas envolvidas nesse processo, bem como as melhorias obtidas pelo LSS.

Quadro 2 - Etapas do processo.

Etapas	Imagens	Descrição
1 – Chiller		O equipamento <i>chiller</i> , tem a função de resfriamento da água, através das bombas e compressor que compõem o sistema, utilizando controlador de temperatura para medição do circuito evaporador, pressostatos de gás, óleo para proteção do compressor e fluxostatos para proteção das bombas no caso de falta de água no circuito. Possui sinalizações para identificar as bombas em operação normal ou em falha, com objetivo de manter o tanque de carregamento com temperatura ideal de 21°C.
		Após a implantação do LSS, foram desenvolvidos os seguintes procedimentos no equipamento: manutenção preventiva bimestral verificando todos os componentes elétricos do <i>chiller</i> (sensores, contadores, disjuntores, controladores, pressostatos e sinalizações), manutenção preditiva (termografia no painel elétrico), rotina diária (acompanhamento de ruídos nas bombas e aferição do sensor, avaliando quantidade de gás no compressor e funcionamento dos pressostatos de segurança). Por meio de um manômetro de pressão é possível identificar o entupimento da condensadora do <i>chiller</i> .
2 - Tanque de Carregamento		Composto por barramentos de alumínio e chumbo para fixação das gancheras que são inseridas as peças. Nessa etapa, ocorre a abertura dos poros das peças, necessitando que as bombas do <i>chiller</i> , compressor, pressostatos, e sensores de temperaturas estejam em perfeitas condições de funcionamento e aferição, já que qualquer diferença acima de 1°C ocasiona manchas, ou perdas das peças. Além do equipamento <i>chiller</i> , o equipamento retificador é essencial nesse processo, pois se a tensão do retificador não estiver estabilizada entre 11.5V a 12.5V, as peças submersas serão deterioradas, perdendo o brilho ou danificando a mesma.
		Nessa etapa, a equipe da produção do setor anodização passou a fazer anualmente a manutenção de todo o tanque de carregamento, realizando a desmontagem e substituição das barras de alumínio centrais (pólos negativo e positivo), as barras de alumínio que saem do retificador até a conexão do tanque, as placas de chumbos, canos de pvc que ficam dentro do tanque para fazer a circulação da água e a substituição de todos os parafusos de inox com a utilização de pasta de cobre para melhorar o contato e diminuir o aquecimento nas conexões.

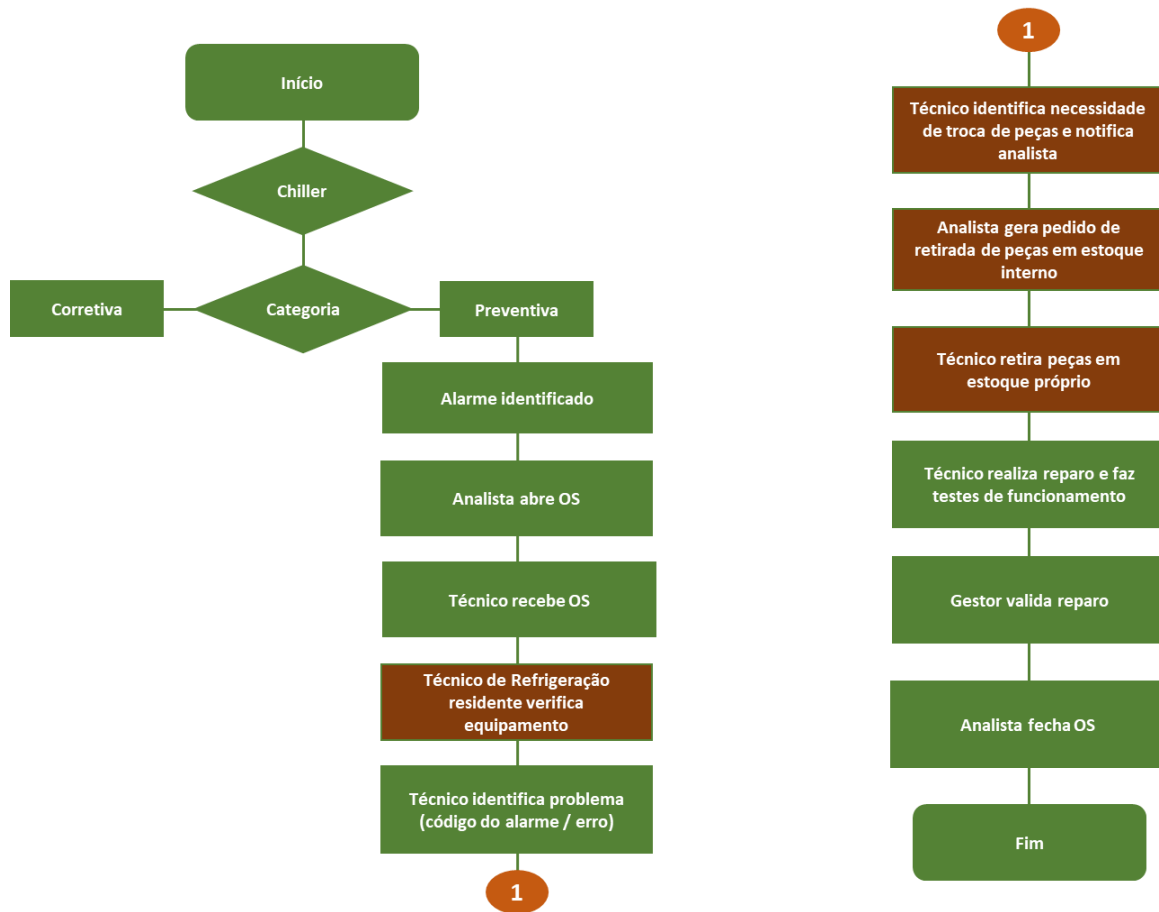
3 - Painei tanque de carregamento		<p>Formado por temporizadores, controlador de temperatura e sinalizações. A principal função dos temporizadores são contabilizar o tempo que as gancheiras compostas por peças ficam submersas no tanque de carregamento. Assim que atingir o tempo, aciona a sinalização verde. O controlador de temperatura tem a função de medir a temperatura do tanque através do sensor PT-100 (temperatura ideal 21°C), o sensor irá indicar se o processo está funcionando normalmente ou possui alguma anormalidade. A aferição do sensor é fundamental nesse processo. Caso a temperatura estiver divergente, acionar-se-á um sinaleiro vermelho, avisando aos operadores que o sistema está com alguma avaria no sensor, bombas ou compressor. O controlador de temperatura possui a função de ligar e desligar o compressor, dependendo da temperatura medida. Depois da implantação do LSS, foi realizado um plano de preventiva bimestral, uma rotina de manutenção mensal para verificar a funcionalidade dos temporizadores, <i>reed switch</i> de comando, botões de comando, sinalizações e aferição do sensor de temperatura.</p>
4 - Trocador de calor		<p>Tem a função de fazer a troca de calor entre o tanque de carregamento (bomba química fixada ao lado do tanque) e o <i>chiller</i> (bomba evaporador e unidade evaporador). Caso esteja com obstrução nas placas por conta de sujeira, a temperatura do tanque irá aumentar, causando variação nas peças. Após implantação do LSS, foi desenvolvido um plano trimestral de manutenção no trocador de calor, realizando a desmontagem das placas, fazendo-se limpeza interna, retirando-se os excessos de calcários do sistema, acrescentando-se manômetros de temperatura e de pressão, para analisar a água dentro do controlador. O ideal do valor no manômetro é ser igual à temperatura do tanque de carregamento e unidade evaporadora do <i>chiller</i>.</p>
5 – Torre de Resfriamento	 	<p>Realiza a troca de calor entre a bomba do condensador e a unidade condensadora do <i>chiller</i> com a torre de resfriamento. Caso a bomba do condensador ou bomba da torre de resfriamento estiver desligada, a temperatura do tanque de carregamento irá aumentar, ocorrendo obstrução das colmeias da torre. A temperatura de trabalho ideal da torre de resfriamento é 24°C, possuindo um sistema automático com controlador de temperatura e utilizando sensor PT-100 para medição, tendo alarme sonoro de temperatura alta e proteções elétricas do sistema.</p> <p>Com a implantação do LSS, foi determinada a substituição das colmeias da torre de resfriamento uma vez ao ano e a limpeza interna dela. Trimestralmente, é realizada a manutenção preventiva no painel elétrico, verificando os contadores, disjuntores, sinalizações e aferição do sensor PT-100, a verificação da hélice do ventilador da torre e substituição dos rolamentos do motor.</p>

6 - Retificador		O equipamento retificador é essencial nesse processo, pois se a tensão do retificador não estiver estabilizada entre 11.5V a 12.5V, as peças submersas serão deterioradas, perdendo o brilho ou danificando a mesma.
		Posterior a implantação do LSS nessa etapa, foi inserida a manutenção preventiva do equipamento realizada uma vez ao ano, verificando-se os sinais de saída da placa eletrônica de potência, dos tiristores e diodos de retificação, além do sistema elétrico do equipamento. Há que se recalcular, num futuro próximo, se os ganhos obtidos (em nível sigma) foram mantidos.
7 - Peças produção		Amostra de peças boas, após realização de todos os processos dentro do setor anodização, continuando o fluxo para a próxima etapa.
		Amostra de peças manchadas, devido as falhas de temperatura alta no <i>chiller</i> , e por excesso de tempo dentro do tanque de carregamento.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Após as modificações produzidas pelo LSS, um novo processo foi implementado para que os *chillers* operem nas melhores condições, reduzindo os defeitos de qualidade nas peças. Na Figura 3, em cores escuras, segue o novo mapeamento do processo de manutenção.

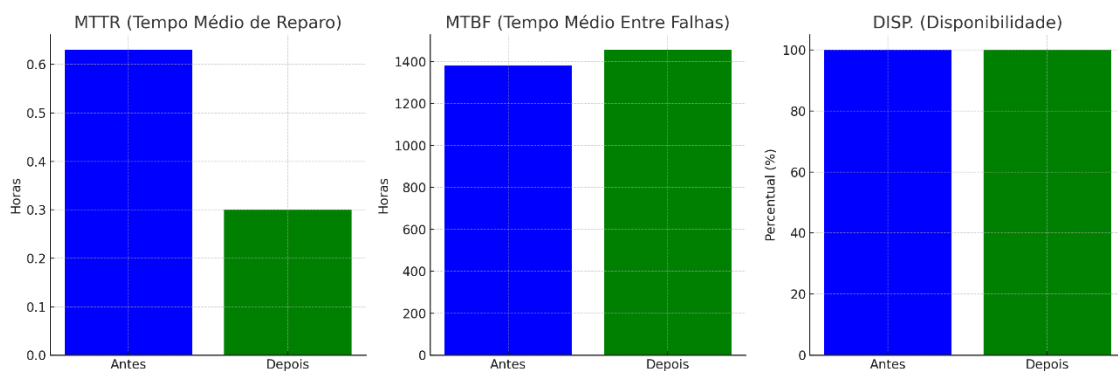
Figura 3 – Mapeamento do novo processo de manutenção dos chillers.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Após a implementação do projeto, os resultados mostraram melhorias em todas as métricas-chave: MTTR foi reduzido de 0,63 para 0,30 horas, indicando tempos de reparo mais curtos; MTBF aumentou de 1382,62 para 1455,95 horas, sugerindo maior confiabilidade do sistema e Disponibilidade aumentou de 99,94% para 99,98%, indicando maior tempo operacional do equipamento.

Gráfico 1 – Resultados do projeto.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

5. Considerações finais.

O estudo abordou a aplicação do LSS, utilizando a metodologia DMAIC, em uma empresa manufatureira com foco na melhoria do processo de anodização de tampas de alumínio. A implementação dessa metodologia possibilitou identificar e solucionar problemas relacionados a variações nas cores e acabamentos das peças que estavam gerando falhas na pigmentação, aumento do retrabalho e custos adicionais ao processo. Um dos principais desafios encontrados foi a alta rotatividade dos funcionários, resultando na perda de conhecimentos adquiridos e reduzindo a capacidade de resolução de problemas. Além disso, a dificuldade em diminuir horas extras e manter um número constante de colaboradores na área operacional também foi um desafio significativo.

O projeto revelou várias oportunidades, incluindo a otimização dos tempos de processamento e a implementação de práticas de manutenção mais eficazes. A análise detalhada dos processos e a utilização da metodologia LSS permitiram uma compreensão profunda das causas raízes dos problemas e possibilitou a definição de ações corretivas precisas. A instalação de manômetros no *chiller* e no trocador de calor demonstrou ser uma medida eficaz para monitorar e antecipar falhas no sistema, contribuindo para a melhoria contínua do processo. Essas ações resultaram em melhorias no tempo de reparo médio (MTTR) caindo de 0,63 horas para 0,30, indicando uma redução significativa de aproximadamente 52,4%. Isso demonstra que, após as ações, o tempo necessário para reparar os equipamentos diminuiu, resultando em uma maior eficiência operacional. Houve um aumento no tempo médio de operação entre falhas (MTBF) de 1381,62 horas para 1455,95, indicando que o intervalo entre as falhas foi prolongado. Esse aumento de aproximadamente 5,4% sugere que, após as melhorias, os equipamentos passaram a operar por períodos mais longos sem apresentar falhas, o que reflete um aumento da confiabilidade dos sistemas. E, por fim, a disponibilidade aumentou de 99,94% para 99,98%, uma melhoria relativamente pequena, mas importante, que indica uma redução nas falhas e paradas inesperadas, garantindo que os equipamentos estivessem ainda mais disponíveis para operação após as melhorias.

Em suma, a aplicação do LSS na empresa manufatureira trouxe melhorias substanciais no processo de anodização, reduzindo variações e retrabalho e otimizando custos. No entanto, a continuidade dessas melhorias depende da capacidade da empresa em enfrentar os desafios relacionados à gestão de pessoas e à comunicação interna. O investimento em treinamentos contínuos, a retenção de talentos e o aprimoramento da comunicação interdepartamental serão essenciais para sustentar e ampliar os benefícios alcançados.

Este estudo se concentrou em um único caso de uma empresa manufatureira, o que limita a generalização dos resultados para outras indústrias ou contextos. Além disso, as coletas de dados foram realizadas em apenas dois períodos, entre fevereiro/março e agosto/setembro, o que pode ter limitado a capacidade de avaliar o impacto das melhorias a longo prazo. Mais tempo e coletas de dados em outros momentos seriam necessários para uma análise mais abrangente da sustentabilidade das melhorias implementadas. A alta rotatividade de funcionários e a falta de comunicação interdepartamental também se mostraram barreiras significativas à implementação de melhorias contínuas, influenciando a capacidade de sustentar as melhorias ao longo do tempo.

Para futuras pesquisas, por se tratar de um estudo de caso único, seria interessante explorar estratégias adotadas por outras empresas similares para minimizar a rotatividade dos funcionários e assegurar a retenção de conhecimentos adquiridos. Adicionalmente, investigar métodos para melhorar a comunicação entre os setores de FM, produção e Planejamento e Controle da Produção (PCP) poderia aumentar a eficiência e reduzir a ocorrência de problemas operacionais. Outra vertente promissora seria a análise de novas tecnologias e práticas de manutenção preventiva e preditiva, que poderiam proporcionar maior constância e continuidade no processo de anodização, especialmente em contextos de alta rotatividade de pessoal. Finalmente, estudos comparativos envolvendo múltiplas empresas do setor manufatureiro poderiam fornecer insights adicionais sobre a eficácia da aplicação do LSS em diferentes ambientes produtivos e culturais.

Referências.

- AKBULUT-BAILEY, A.Y.; MOTWANI, J.; SMEDLEY, E.M. When *Lean* and Six Sigma converge: a case study of a successful implementation of *Lean Six Sigma* at an aerospace company. **International Journal of Technology Management**, Vol. 75 Nos 1/2/3, pp. 18-32, 2012.
- ALBLIWI, S.; ANTONY, J.; ABDUL HALIM LIM, S.; VAN DER WIELE, T. Critical failure factors of *Lean Six Sigma*: a systematic literature review, **International Journal of Quality & Reliability Management**, 31(9), 1012-1030, 2014. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2013-0147>.
- ALEXANDER, K. Facilities Management in the New Organization, *Facilities*, Vol. 10 Iss 1 pp. 6 – 9, 1992.
- ANTONY, J., SNEE, R., & HOERL, R. Lean Six Sigma: Research and practice. **International Journal of Lean Six Sigma**, 13(1), 1-23, 2022.
- ATKIN, B.; BROOKS, A. **Total Facilities Management**, Blackwell Science, Oxford, 2000.
- BHUIYAN, N., BAGHEL, A.; WILSON, J. A sustainable continuous improvement methodology at an aerospace company. **International Journal of Productivity and Performance Management**, Vol. 55 No. 8, pp. 671-687, 2006.
- BRÖCHNER, J.; HAUGEN, T.; HAUGEN, C. Shaping tomorrow's facilities management. **Facilities** Vol. 37 No. 7/8, p. 366-380, 2019.
- BYRNE, G.; LUBOWE, D.; BLITZ, A. Using a *Lean Six Sigma* approach to drive innovation, **Strategy & Leadership**, Vol. 35 No. 2, pp. 5-10, 2007.
- CHAKRAVORTY, S.S.; SHAH, A.D. *Lean Six Sigma* (LSS): an implementation experience, **European Journal of Industrial Engineering**, Vol. 6 No. 1, pp. 118-137, 2012.
- CHEN, M.; LYU, J. A. *Lean Six-Sigma* approach to touch panel quality improvement, **Production Planning & Control**, Vol. 20 No. 5, pp. 445-454, 2009.
- CHOTIPANICH, S. Positioning facility management. **Facilities**, Vol. 22 Iss 13/14 pp. 364 – 372, 2004.
- CRAWFORD, R. Ammunition enterprise excellence ready for tomorrow. **USA Armor School Research Library**, 2004.
- DROHOMERETSKI, E.; GOUVEA DA COSTA, S.; PINHEIRO DE LIMA, E.; ANDREA DA ROSA, P. *Lean*, Six Sigma and *Lean Six Sigma*: an analysis based on operations strategy, **International Journal of Production Research**, Vol. 52 No. 3, pp. 804-824, 2013.
- GIJO, E., ANTONY, J., & KUMAR, M. DMAIC in practice: A case study on Six Sigma in the electronics industry. **Total Quality Management & Business Excellence**, 33(4), 710-728, 2022
- GNANARAJ, S. M. et al. DOLADMAICS: A model for implementing *Lean Six Sigma* in contemporary SMEs. **International Journal of Services and Operations Management**, v. 7, n. 4, p. 440-464, 2010.
- GUPTA, P., & JAIN, A. Leveraging DMAIC methodology for operational efficiency: A comprehensive review. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, 17(2), 138-155, 2023.

ISO 41001:2020. facility management — management systems — requirements with guidance for use. Acesso: 7 março 2024. Disponível em: <https://www.abntcolecao.com.br/normavw.aspx?Q=Dxj4vfrqa1a2yujtdufirvddsng5c2p4sefzdeozt2gwdevjetlktzlc0=>

JONES, E. C.; PARAST, M. M.; ADAMS, S. G. A framework for effective Six Sigma implementation. **Total Quality Management**, 21(4), 415-424, 2010.

LEE, L.; WEI, C. Reducing mold changing time by implementing *Lean Six Sigma*, **Quality and Reliability Engineering International**, Vol. 26 No. 4, pp. 387-395, 2009.

LEE, W. The role of support services and FM in the introduction of change management, in Reuvid, J. and Hinks, J. (Eds), **Managing Business Support Services**, 2nd ed, 2002.

MALEYEFF, J., ARNHEITER, A.E.; VENKATESWARAN, V. The continuing evolution of *Lean Six Sigma*, **TQM Journal**, Vol. 24 No. 6, pp. 542-555, 2012.

MARTIN, J.W. *Lean Six Sigma for Supply Chain Management, the 10-Step Solution Process*, **McGraw-Hill**, New York, NY, 2007.

MCADAM, R.; DONEGAN, S. A comparative analysis of trilateral and concurrent business improvement methodologies in the high technology sector, **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, Vol. 5 No. 3, pp. 210-31, 2003.

NOTA, G.; PELUS, D.; TORO LAZO, A. The contribution of Industry 4.0 technologies to facility management. **International Journal of Engineering Business Management** Volume 13: 1–14, 2021.

PEREIRA, C.M.; ANHOLON, R.; BATOCCHIO, A. Obstacles and difficulties implementing the *Lean* philosophy in Brazilian enterprises. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, 14(2), 218, 2017. <https://doi.org/10.14488/bjopm.2017.v14.n2.a10>

PEARCE, A. R. Sustainable Urban Facilities Management. Encyclopedia of Sustainable Technologies, Vol. 2, Myers-Lawson School of Construction, Blacksburg, VA, United States, 2017.

PIAIA, E.; TOVAZZI COSTA, M. V.; QUINELLO, R. A percepção de gestores de facilities sobre o estado de conservação das infraestruturas prediais no Estado de São. **E&S - Engineering and Science**, v.11, ed 11.2, 2022.

SHAHIN, A.; ALINAVAZ, M. Integrative approach and framework of *Lean Six Sigma*: a literature perspective, **International Journal of Process Management and Benchmarking**, Vol. 2 No. 4, pp. 323-337, 2008.

SHANKAR, R. Process improvement. Using Six Sigma. A DMAIC guide, **Wisconsin: ASQ Quality Press**, 2009.

SHOKRI, A., NABHANI, F., & HODGSON, S. Lean Six Sigma readiness in small and medium-sized enterprises: A case study in the manufacturing sector. **Journal of Manufacturing Systems**, 68, 334-345, 2022.

- SHOKRI, A.; WARING, T. S.; NABHANI, F. Investigating the readiness of people in manufacturing SMEs to embark on *Lean Six Sigma* projects: An empirical study in the German manufacturing sector. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 36, n. 8, p. 850-878, 2016.
- SMITH, B. *Lean* and Six Sigma-a one-two punch, *Quality Progress*, Vol. 36 No. 4, pp. 37-41, 2003.
- THOMAS, A.; BARTON, R.; OKAFOR, C. Applying *Lean six sigma* in a small engineering company – a model for change, **Journal of Manufacturing Technology Management**, Vol. 20 No. 1, pp. 113-129, 2009.
- THOMSON, T. Matching Services to Business Needs: Resourcing Routine Services and Projects, **Facilities**, Vol. 9 No. 6, pp. 7-13, 1991.
- TOHIDI, H. Six Sigma methodology and its relationship with *Lean* manufacturing system. **Advances in Environmental Biology**, 6(2), 895–906, 2012.
- VINODH, S., ANISH, R., & KUMAR, S. Lean thinking in the digital age: A critical review and future directions. **Journal of Cleaner Production**, 347, 131-164, 2022.
- VINODH, S.; KUMAR, S.V.; VIMAL, K.E.K. Implementing *Lean Sigma* in an Indian rotary switches manufacturing organisation, **Production Planning & Control**, Vol. 25 No. 4, pp. 1-15, 2012.
- WOMACK, J.P.; JONES, D.T. *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, **Free Press**, New York, NY, 2003.
- WOMACK, J.P.; JONES, D.T.; ROSS, D. A mentalidade enxuta nas empresas *Lean Thinking: elimine o desperdício e crie riqueza*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, p.408, 2004.
- WOMACK, J.P.; JONES, D.T.; ROSS, D. *The Machine that Changed the World*, **Rawson Associates/Macmillan Publishing Company**, New York, NY, 1990.
- YIN, R. K. Estudo de Caso: Planejamento e Método, 3^a. ed. **Porto Alegre, Bookman**, 2005.
- ZHANG, W.; HILL, A. V.; GILBREATH, G. H. A Research Agenda for Six Sigma Research, **Quality Management Journal**, 18:1, 39-53, 2011.
- ZHOU, H., WANG, J., & LIU, P. Energy efficiency improvements in industrial cooling systems using Lean Six Sigma approaches. **Energy Engineering**, 130(4), 45-62, 2023.
- WADHWA, R., KUMAR, V., & PANDEY, A. Application of DMAIC framework in process industries: A literature review and research agenda. **International Journal of Productivity and Performance Management**, 71(7), 2081-2100, 2022.