

# APLICAÇÃO DA METODOLOGIA LEAN SEIS SIGMA NA REDUÇÃO DE PERDAS DE CATALISADOR: UM ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DO SETOR PETROQUÍMICO

Lucas Gonçalves Cruz <sup>1</sup>  
George Simonelli <sup>2</sup>

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso da aplicação da metodologia Lean Seis Sigma (LSS) em uma empresa do setor petroquímico, visando reduzir perdas de catalisador ao longo do processo. A empresa em questão é voltada para produção de aldeídos através da hidroformilação de derivados do petróleo. O LSS busca reduzir a variabilidade e os custos de um processo, aumentando assim a competitividade da empresa. O estudo seguiu a estrutura do DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) em seu desenvolvimento. O sistema de medição utilizado no processo foi validado pelo estudo de Reprodutibilidade e Repetibilidade (R&R), permitindo a avaliação correta dos principais locais e causas geradoras de perdas de catalisador. O projeto atingiu seu objetivo através de mudanças na gestão e na forma de operar o processo, reduzindo uma perda média mensal de 1,066 kg/mês para 0,105 kg/mês de catalisador. Assim sendo, houve uma redução de 90,91% na perda de catalisador, melhorando o retorno financeiro da empresa.

**Palavras-chave:** Lean Seis Sigma; Redução de custos; Melhoria contínua.

## INTRODUÇÃO

Com o atual cenário de competitividade, empresas do setor químico vêm buscando constantemente melhorias nos processos produtivos. Um dos meios de aumentar a competitividade de uma empresa é através da redução de custos (MIRON, CAVALCANTI, WONGTSCHOWSKI 2005). Nesse contexto, metodologias que visam melhoria contínua

---

<sup>1</sup> Graduando do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal da Bahia - UFBA, lucas\_gc1@hotmail.com;

<sup>2</sup> Professor orientador: Doutor em Engenharia Química, Universidade Federal da Bahia - BA, gsimonelli@ufba.br

vêm sendo incorporadas aos processos produtivos, sendo uma delas o Lean Seis Sigma (LSS), nascida da junção entre o *Lean Manufacturing*, ou produção enxuta, e o Seis Sigma. A produção enxuta visa a redução de custos produzindo mais e consumindo cada vez menos, através da identificação e eliminação de desperdícios (PANDE, NEUMAN, CAVANAGH 2001). O Seis Sigma, por sua vez, é uma metodologia mais voltada para o uso de ferramentas estatísticas. Com sua utilização, busca-se reduzir a variabilidade de um processo para mantê-lo dentro das especificações do cliente (WERKMA, 2012).

Neste cenário, o trabalho em questão tem como objetivo a aplicação do LSS em uma empresa da indústria petroquímica, buscando apresentar a estratégia de aplicação adotada, os principais obstáculos encontrados, bem como, as adaptações realizadas para superá-los. A empresa em questão produz aldeídos por meio da hidroformilação de derivados do petróleo. A aplicação do método visou controlar e reduzir as perdas de catalisador ao longo do processo de produção. O catalisador usado é um metal precioso essencial para maior conversão e seletividade da matéria-prima em produto final. Segundo o último levantamento realizado pela empresa, referente ao ano de 2020, o catalisador é o segundo maior custo do processo, representando 17,26% do custo total de produção. Isso justifica a aplicação de uma metodologia robusta como o LSS no estudo das perdas de catalisador no processo.

## METODOLOGIA

O calendário do estudo em questão foi desenvolvido com base no DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar), metodologia utilizada no gerenciamento estratégico de projetos LSS, visando melhorias em processos já existentes (PYZDEC, 2003). O uso deste método permite o desenvolvimento de um maior conhecimento de quais principais causas afetam o desempenho do processo (PANDE, NEUMAN, CAVANAGH 2001). O método DMAIC é constituído por cinco etapas, sendo elas apresentadas de forma resumida no Quadro 1.

**Quadro 1** - Detalhamento das etapas do DMAIC

D – Define (Definir)	Definir com precisão o escopo do projeto
M – Measure (Medir)	Determinar localização ou foco do problema
A – Analyze (Analisar)	Determinar as causas de cada problema prioritário
I – Improve (Melhorar)	Executar soluções para cada problema prioritário
C – Control (Controlar)	Garantir que os resultados sejam mantidos a longo prazo

Fonte: Adaptado Werkema (2012)

Na etapa Definir foi levantado todo o histórico disponível na empresa referente à perda de catalisador. Foram escolhidos os membros da equipe, com profissionais de diferentes áreas, a fim de garantir um grupo multidisciplinar. Além disso, também foi estimado o retorno financeiro, bem como, qual seria nosso principal indicador dos resultados do projeto, sendo selecionado o balanço de massa do catalisador mostrado abaixo.

$$Cd - \sum_{i=1}^{i=n} C_{ei} \cdot V_{ei} = \text{Perda de catalisador}$$

Sendo:

$Cd$  = Catalisador dosado no processo;

$n$  = número de equipamento com presença de catalisador;

$C_{ei}$  = concentração de catalisador no equipamento;

$V_{ei}$  = Volume de líquido no equipamento.

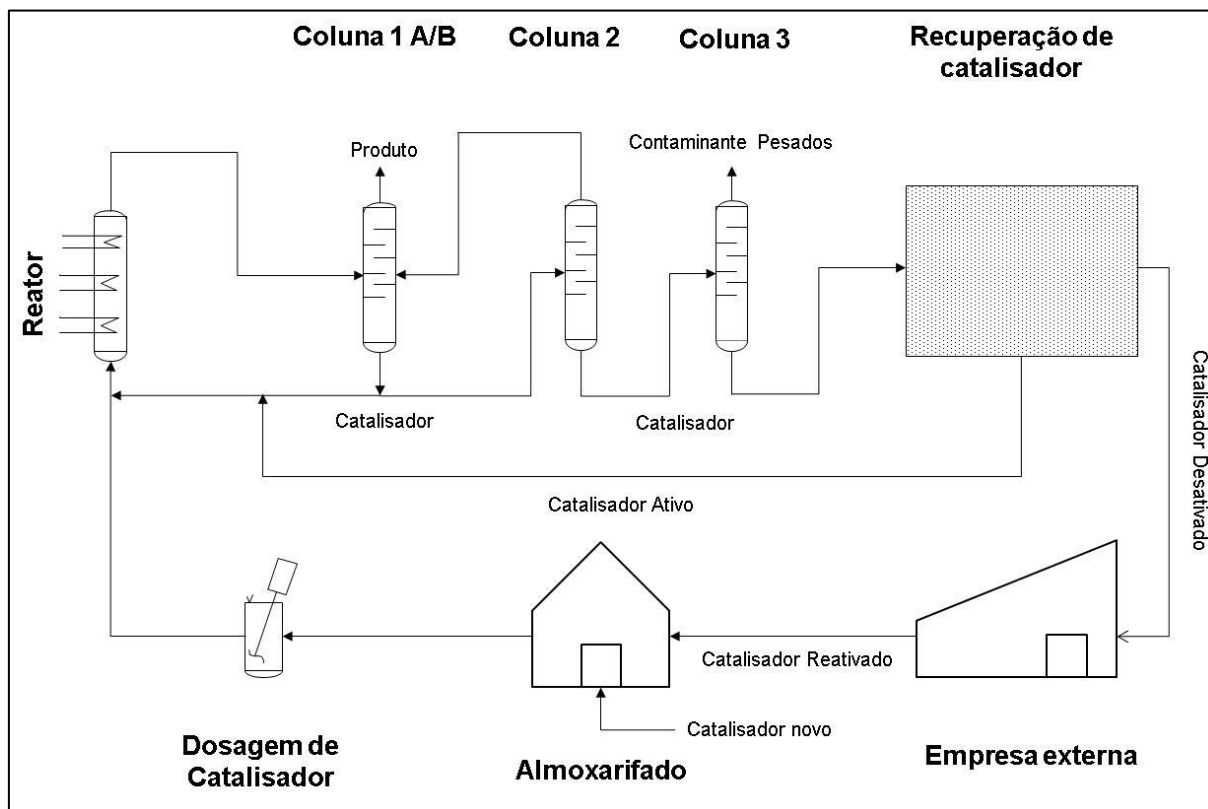
A concentração do catalisador é determinada através de amostras coletadas e analisadas em laboratório próprio da empresa. O balanço de massa já era realizado pela empresa, porém, sem rotina rígida, devido ao alto custo da análise para determinação da concentração de catalisador e elevado número de equipamentos no processo, sendo assim, o intervalo mínimo viável foi definido como bimestral.

Na etapa Medir, a primeira ação realizada foi estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R). A repetibilidade se refere à variação nas medições quando uma mesma amostra é analisada repetidas vezes por um mesmo operador. A reprodutibilidade, por sua vez, se refere à variação dos resultados de uma mesma amostra por diferentes operadores (INMETRO, 2012). O R&R é, portanto, o somatório dessas duas variações (AIAIG, 2010), visando determinar se o sistema de medição possui variabilidade menor do que a do processo a ser aferido, e assim, determinar se o sistema de medição é aceitável (PERUCHI, 2013).

Sendo assim, um sistema de medição cujo objetivo é monitorar, de forma rígida, um processo, deve possuir R&R abaixo de 10%. Em casos onde o R&R está entre 10% a 30%, sua aceitabilidade irá depender da sua aplicação. A decisão deve ser baseada, por exemplo, na importância da medição, na aplicação e no custo para troca ou reparo do dispositivo de medição. Acima de 30% seu uso é considerado inaceitável (AIAIG, 2010). O estudo foi realizado com três amostras, analisadas por três técnicos em triplicata, somando 27 resultados no total. Novamente, vale salientar o alto custo de cada amostra como um limitador. Ainda na

etapa medir, foi desenvolvido o fluxo do processo para o catalisador, apresentado na figura abaixo.

Figura 1: Fluxo do processo para o catalisador



O fluxo do processo referente às correntes com catalisador, de maneira resumida, tem início na sua dosagem e posterior envio aos reatores. Após a reação, o catalisador e os contaminantes são separados do produto na Coluna 1A e na Coluna 1B, colunas semelhantes que operam em série. A base dessas torres alimenta a Coluna 2. Pelo topo dessa coluna ocorre a recuperação de insumos e a corrente de fundo será enviada para a Coluna 3. Nela, contaminantes são eliminados pela corrente de topo. Parte do catalisador é enviado para unidade de recuperação, com posterior reciclo para o sistema, e parte é enviado para reativação em outra empresa.

Com base no mapa do processo, houve o levantamento dos possíveis pontos de perda (Y's), com posterior quantificação, através da análise de amostras coletadas. Por fim, um gráfico de Pareto foi criado, com o objetivo de determinar quais pontos de perda devem ser priorizados. Uma vez priorizado os Y's, deu-se início a etapa Analisar, visando determinar quais as causas fundamentais do problema (X's) que afetam o desempenho dos Y's, e qual desses X's deveriam ser abordados com prioridade. (WERKMA 2012). Dessa forma, foi

desenvolvido um diagrama de Esforço x Impacto, ferramenta utilizada para facilitar a identificação de quais pontos devem ser priorizados e também quais pontos devem ser eliminados, devido seu baixo retorno para a meta do projeto (ECKES, 2003). Com base na avaliação da equipe de qual a dificuldade para solução de cada x e qual impacto positivo essa solução traria, foram priorizados os X's de maior impacto e menor esforço. Com isso, deu-se início à etapa Melhorar.

A etapa Melhorar foi focada na execução das ações priorizadas. Para isso, um plano de ação foi desenvolvido utilizando a metodologia do 5Ws e 1H, ferramenta utilizada para elaborar e auxiliar a execução de um plano de ação no tempo determinado. Na sigla 5W e 1H, cada W e H remetem a inicial das perguntas na língua inglesa apresentadas no quadro abaixo.

**Quadro 2:** Detalhamento 5W1H

Pergunta	Significado	Pergunta instigadora	Direcionador
<i>What?</i>	O quê?	O que deve ser feito?	O objeto
<i>Who?</i>	Quem?	Quem é o responsável?	O sujeito
<i>Where?</i>	Onde?	Onde deve ser feito?	O local
<i>When?</i>	Quando	Quando deve ser feito?	O tempo
<i>Why?</i>	Por quê?	Por que é necessário fazer?	A razão/motivo
<i>How?</i>	Como?	Como será feito?	O método

Fonte: Seleme e Stadler (2012)

Essa ferramenta (5W1H) nos permite demonstrar de maneira simples não só quem é o responsável e qual o prazo, mas também, qual a importância e qual a complexidade na resolução da tarefa (SELEME e STADLER, 2012).

Após melhorias implementadas, deu-se início à etapa Controlar. Esta etapa é essencial para perpetuação dos resultados do projeto. Nela, ocorre o monitoramento do processo, a fim de determinar se os resultados alcançados podem ser mantidos em longo prazo (WERKMA, 2012). Dessa maneira, um plano de controle foi desenvolvido, a fim de perenizar os resultados alcançados.

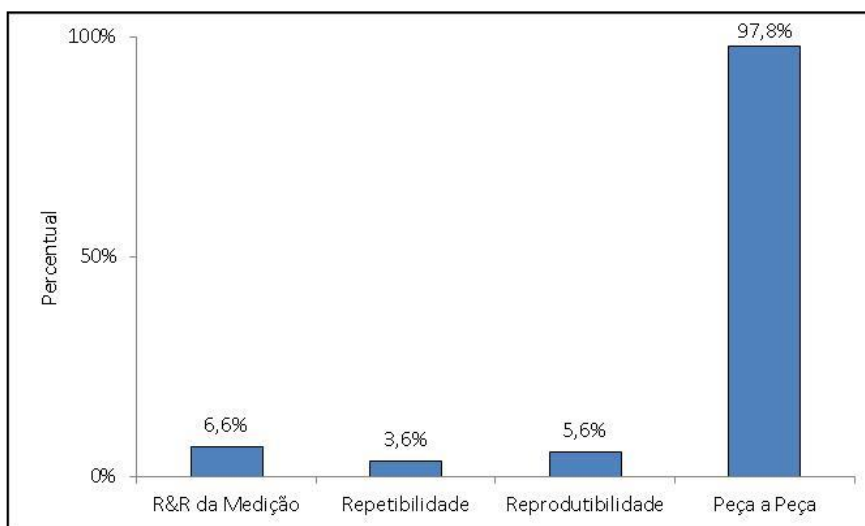
Dentre as ferramentas utilizadas, podemos citar o controle estatístico do processo (CEP), no qual as variações do processo são classificadas entre causas aleatórias e causas especiais. As causas aleatórias são variações inerentes ao processo, que ocorrem dentro de um limite de controle, já as causas especiais, são variações que ultrapassam o limite de controle,

sendo necessário, neste caso, a investigação da causa do descontrole. Esses limites de controle são calculados com base no histórico do processo, sendo necessário mantê-los abaixo dos limites de especificação, a fim de garantir a qualidade do produto (Taghizadegan, 2006). Por fim, foram realizadas uma série de apresentações, a fim de nivelar o conhecimento desenvolvido, demonstrar para as equipes operacionais as mudanças na forma de operar o sistema e a importância de perenizar os resultados obtidos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em linhas gerais, o projeto apresentou o retorno esperado, dado que houve uma redução significativa na perda de catalisador ao longo do processo. O sistema de medição se mostrou confiável, permitindo avaliação precisa dos principais pontos e principais causas de perdas, tornando possível alcançar resultados satisfatórios com menor esforço. Seguindo o roteiro da metodologia DMAIC, o primeiro resultado obtido foi o do estudo da reprodutibilidade e repetibilidade do sistema de medição. Este é apresentado na Figura 3.

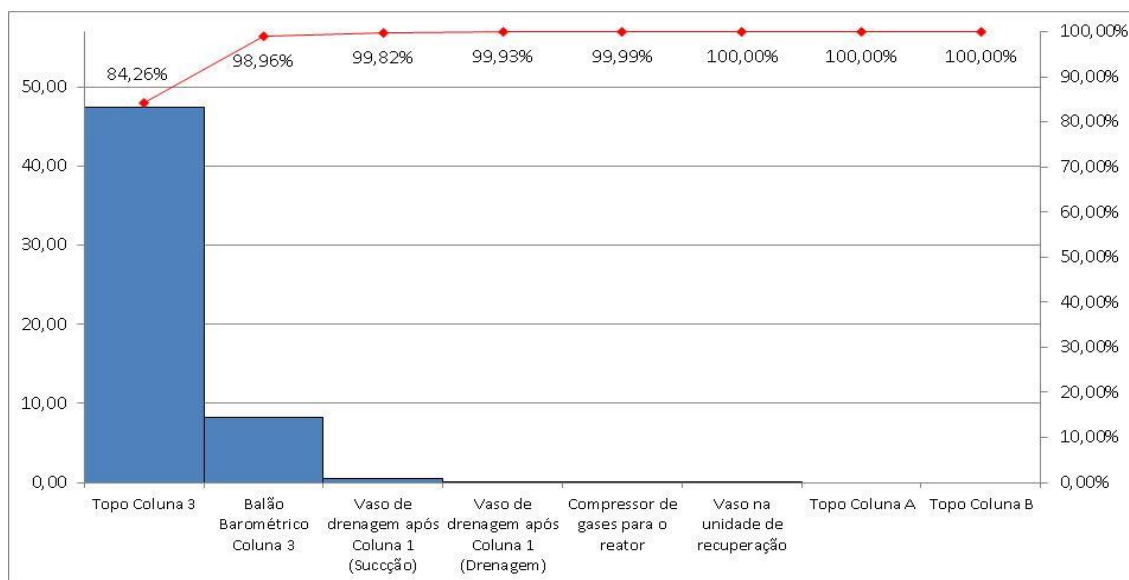
**Figura 3:** Resultado do estudo de reprodutibilidade e repetibilidade (R&R)



O resultado de 6,6% para o R&R total mostra que o sistema de medição é aceitável para as análises da presença de catalisador nas correntes, uma vez que este resultado é menor que 10%. O resultado de 97,8% para Peça a Peça mostra que o método é capaz de distinguir de forma segura as diferentes concentrações das amostras (Minitab, 2019). Isto posto, oito possíveis pontos de perda foram levantados para análise. O gráfico de Pareto demonstrando a

perda de catalisador em cada ponto levantado na etapa de priorização de Y's é apresentado na Figura 4.

**Figura 4:** Gráfico de Pareto para perda de catalisador



Com base na análise realizada do gráfico de Pareto, chegamos à conclusão que nosso principal ponto de perda era no topo da Coluna 3, representando 84,26% de toda perda. Devido o aumento do preço do catalisador metálico ser um evento recente, a coluna operava em condições forçadas, a fim de maximizar a eliminação de pesados do sistema. Sendo assim, os esforços, na etapa analisar e melhorar, foram voltados a otimização dos parâmetros dessa torre para redução da perda de catalisador pela purga de topo. O topo da coluna A e o topo da coluna B apresentaram resultados de concentração de catalisador abaixo do limite de detecção do método, de 0,25 ppm de catalisador, sendo assim, elas não foram consideradas no estudo.

Além dos oito pontos citados, existem mais dois que merecem destaque. O primeiro deles é a corrente retirada na base da coluna Coluna 1 A e B, corrente rica em catalisador, para análise de composição no cromatógrafo *online*, a qual, apesar de ser uma pequena alíquota, sua retirada era constante e após análise era descartada. O levantamento dessa possível perda foi realizado após a estratificação dos Y's. O segundo ponto é a perda de catalisador devido vazamentos em equipamentos. Tendo em vista a dificuldade na sua quantificação e o caráter esporádico, esse não foi incluído no estudo de priorização. Para ambos os pontos, melhorias foram incluídas no plano de ação, com base na experiência da equipe. Após reuniões para levantamento de ideias realizadas na etapa Analisar, um total de quinze X's foram levantados, sendo eles apresentados no quadro abaixo.

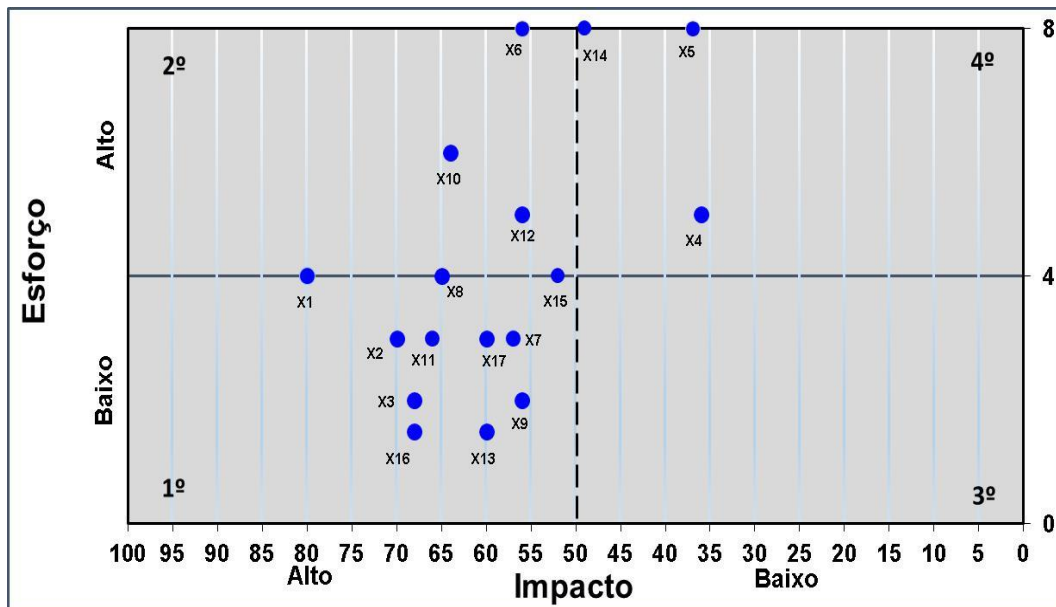


**Quadro 3:** Principais causas de perdas

X1	Parâmetros da Coluna 3 não otimizados para menor perda de catalisador	X2	Ineficiência no controle de vapor direto na Coluna 3
X3	Ineficiência no controle do refluxo na Coluna 3	X4	Distúrbio no controle de pressão na Coluna 3
X5	Ineficiência das bandejas da Coluna 3	X6	Subdimensionamento da Coluna 3
X7	Ineficiência no controle do nível da Coluna 3	X8	Ineficiência no controle de vapor para o reboiler da Coluna 3
X9	Ineficiência no Ejetor (controle de vácuo) da Coluna 3	X10	Ineficiência no controle da Temperatura do balão de refluxo da Coluna 3
X11	Ineficiência no controle da vazão de alimentação da Coluna 3	X12	Ineficiência no controle da temperatura da água de resfriamento
X13	Ineficiência no controle dos parâmetros da Coluna 2	X14	Subdimensionamento da Coluna 2
X15	Deficiência na instrumentação da Coluna 2	X16	Ineficiência no plano de manutenção de bombas e válvulas (vazamentos)
X17	Descarte da alíquota analisada no cromatógrafo online	-	-

Das ações levantadas, quatro foram canceladas devido ao seu baixo impacto e alto esforço (X6, X14, X4 e X5). Cinco foram classificadas para implementação em médio longo prazo (X1, X8, X15, X10 e X12), e os demais (X16, X13, X9, X3, X7, X17, X11 e X2) foram priorizadas para realização imediata devido ao seu alto impacto com baixo esforço. Os resultados citados podem ser melhor visualizados na matriz de esforço x impacto apresentada na Figura 5.

**Figura 5:** Matriz de esforço x Impacto

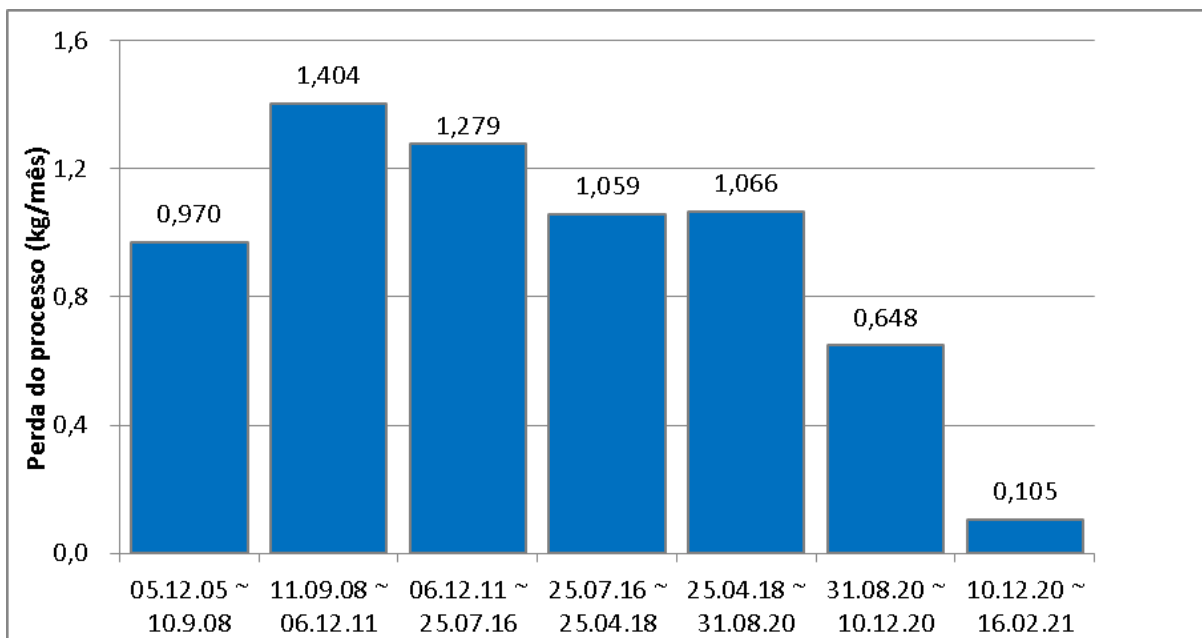


Com base nos onze X's selecionados, um total de dezessete ações foram incluídas no plano de ação, dentre elas, podemos citar como principais para a evolução do projeto: A rota para identificação de vazamentos, a mudança nos parâmetros operacionais da Coluna 3 e o



reciclo das amostras que eram eliminadas após análise pelo cromatógrafo online. Na rota para identificação de vazamentos, todo o fluxo do processo para o catalisador foi percorrido e um total de quinze equipamentos com vazamento de catalisador foram identificados; todas as ocorrências foram classificadas como prioridade alta, e os vazamentos solucionados. No que se refere à avaliação dos parâmetros operacionais da Coluna 3, tendo em vista que a principal função dessa coluna é a eliminação de contaminantes pesados pela corrente de topo, o esforço foi voltado para a busca de um ponto ótimo de operação, visando manter a perda de catalisador controlada, porém mantendo uma retirada suficiente de contaminantes do sistema. Foi necessário também a atuação em outras variáveis do sistema, como nas temperaturas dos reatores visando reduzir a formação de pesados, e, conseqüentemente, a necessidade de retirada. Por fim, para o reciclo da corrente analisada pelo cromatógrafo online, um projeto foi desenvolvido para que essa corrente, anteriormente eliminada com os rejeitos do processo após análise, seja armazenada em um coletor e reciclada para o sistema, evitando a perda. Os impactos dessas e das demais ações podem ser visualizados nos resultados do balanço de massa do catalisador apresentado abaixo.

**Gráfico 4:** Balanço da perda do Catalisador



Com base no gráfico observamos que o sistema possuía uma média mensal de 1,556 kg de catalisador perdido por mês antes do início do projeto de redução. No resultado representando a perda média mensal de catalisador no período de 31.08.2020 à 10.12.2020, primeiro resultado após aplicação do LSS, já implementadas as ações da eliminação de pontos

de vazamentos, bem como o reciclo da corrente analisada no cromatógrafo online, obtivemos uma perda de 0,648 kg de catalisador por mês. Como pode ser visto, apenas com aplicação parcial das ações, e sem alterações significativas na coluna de pesados, principal ponto de perda, já houve uma redução de 43,93% em relação à média antes da aplicação do LSS, evidenciando que não havia um controle rígido para perda de catalisador, tendo em vista que o resultado desse primeiro balanço, após melhorias parciais do projeto, foi o menor já obtido. Já no ponto representando o período de 10.12.20 à 16.02.2021, após conclusão das ações voltadas para o controle da coluna de pesados, obtivemos uma perda média mensal de 0,105 kg/mês de catalisador, representando uma redução de 90,91% em relação à média inicial, corroborando que o principal ponto de perda de catalisador no sistema era a corrente de topo da coluna de pesados.

Um plano de controle foi desenvolvido e como principais ações podemos destacar: a rota de verificação dos equipamentos com presença de catalisador na corrente, com classificação de prioridade alta para os vazamentos e frequência quinzenal. Foi também desenvolvido um acompanhamento via CEP dos parâmetros da coluna de pesados, com análises críticas em reuniões diárias sobre o comportamento da torre, investigações e ações corretivas imediatas. Bem como, a exposição online dos parâmetros em *dashboards* e acompanhamento da concentração de catalisador no topo da coluna de pesados, através da análise de amostras compostas, com uma frequência de três vezes por semana.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta um estudo de caso de aplicação da metodologia *Lean Six Sigma* em uma indústria química visando a redução da perda de catalisador. O uso das amplas ferramentas oferecidas pelo LSS permitiu não só a identificação dos principais pontos de perda, como também sua mitigação e controle, obtendo uma redução de 90,91% nas perdas de catalisador. Outro ponto a ser destacado foi a mudança na gestão e na forma de operar o sistema, agora visando a menor perda de catalisador. Os novos controles foram implementados, e as equipes de operação foram treinadas e conscientizadas da importância de manter a estabilidade da coluna de pesados, bem como acompanhar e priorizar vazamentos na área referentes a equipamentos com presença de catalisador na corrente, a fim de perenizar os resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG). **Measurement systems analysis Reference Manual**. 4, ed, 2010

ECKES, George. **Six Sigma for everyone**, New Jersey: Wiley & Sons, Inc.2003.

INMETRO, **Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. Duque de Caxias, RJ: INMETRO. 2012.

MINITAB, Interpretar os principais resultados para Estudo de medição R&R cruzado, c2019. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/crossed-gage-r-r-study/interpret-the-results/key-results/>> Acesso em: 23 abril 2021.

MIRON, M., CAVALCANTI, F., WONGTSCHOWSKI, P. Inovação tecnológica e produção no setor químico, **Química Nova**, v. 28, Suplemento, p.86-90, 2005.

PANDE, P.S.; NEUMAN, R.P.; CAVANAGH, R.R.. **Estratégia seis sigma**: como GE, a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PERUCHI, Rogério Santana. **MDMAIC**: um roadmap seis sigma multivariado. Tese de doutorado (Engenharia de produção) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá: UNIFEI,2014.

PYZDEK, T; Keller, P.A, **The Six Sigma Handbook**: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels, New York: McGraw-Hill, 2003.

SELEME, R; STADLER, H, **Controle de qualidade**: As ferramentas essenciais. 2, ed, Curitiba: Ibpex, 2012

TAGHIZADEGAN, S. **Essentials of Lean Six Sigma**. 1 Ed. Estados Unidos: Butterworth-Heinemann, 2006.

WERKEMA, Cristina, **Criando a cultura lean seis sigma**. 3, ed. Rio de Janeiro : Elsevier, 2012.