



USO DA METODOLOGIA PFMEA PARA ANÁLISE DE MELHORIAS EM UM PROCESSO PRODUTIVO

MARCOS ROGÉRIO CICONETI
EDSON SIDNEI MACIEL TEIXEIRA

RESUMO

A fim de atender às exigências do mercado e entregar produtos e soluções que possam obter um diferencial competitivo, é desejável que as empresas desenvolvam e apliquem metodologias de qualidade em seus processos produtivos. O objetivo deste trabalho foi apresentar uma proposta de implantação da metodologia PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis – Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos no Processo), em uma linha de produção de uma empresa de manufatura de termoplásticos. O setor em estudo apresentava problemas de não conformidade, que geravam custos com retrabalho e insatisfação dos clientes. A aplicação do método possibilitou identificar falhas potenciais, investigar suas causas e propor melhorias para aumentar a robustez do processo produtivo. Com base nessa análise, foram sugeridos treinamentos e ações corretivas visando à redução de retrabalhos e à prevenção de falhas antes do início da produção. Concluiu-se que a aplicação estruturada do PFMEA, integrada às ferramentas da qualidade, contribui para prever e minimizar falhas potenciais, reduzir custos de produção e aumentar a eficiência, eficácia e competitividade dos produtos no mercado.

Palavras-chave: PFMEA; ferramentas da qualidade; processos produtivos.

USE OF THE PFMEA METHODOLOGY FOR PROCESS IMPROVEMENT ANALYSIS IN A PRODUCTION LINE

ABSTRACT

To meet market demands and deliver products and solutions with a competitive advantage, companies must develop and implement quality methodologies in their production processes. This study aims to propose the implementation of the PFMEA methodology (Process Failure Mode and Effects Analysis), in a production line of a thermoplastics manufacturing company. The sector under study exhibited nonconformities, leading to rework costs and customer dissatisfaction. The application of PFMEA enabled the identification of potential failures, investigation of their causes, and proposal of improvements to enhance process robustness. Based on this analysis, training and corrective actions were suggested to reduce rework and prevent failures before production begins. It is concluded that the structured application of PFMEA, integrated with other quality tools, helps anticipate and minimize potential failures, reduce production costs, and improve the efficiency, effectiveness, and competitiveness of products in the market.

Keywords: PFMEA; quality tools; production processes.



INTRODUÇÃO

O cenário globalizado e competitivo exige das organizações uma gestão consistente e estratégica, capaz de garantir a melhoria contínua na tomada de decisões, prevenindo falhas, minimizando perdas e maximizando oportunidades. Nesse contexto, torna-se muito importante o conhecimento e o gerenciamento de processos e riscos, de forma a fortalecer a capacidade competitiva e preservar a imagem institucional frente ao mercado. Para isso, diversas ferramentas de análise de riscos podem ser aplicadas, tais como a árvore de decisão, a matriz de riscos, a análise do valor agregado, a análise de Monte Carlo e, de forma destacada, o *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) (COLIN, 2007; DEGEN et al, 2010).

O FMEA é um método sistemático de identificação, análise e prevenção de falhas potenciais em processos e sistemas, estabelecido inicialmente em 1949 como uma regulamentação militar nos Estados Unidos para avaliação de confiabilidade de equipamentos. Ao longo das décadas, o método foi sendo adaptado e aplicado em diferentes setores, passando pela NASA nos anos 1960, pela indústria aeronáutica e naval nos anos 1970, e consolidando-se na indústria automotiva em 1977 como ferramenta preventiva de garantia da qualidade (KREJCI et al, 2019). Desde então, o FMEA vem sendo empregado amplamente em setores como energia nuclear, aeroespacial, químico, eletrônico, alimentício e, mais recentemente, na área da saúde (SILVESTRI, DE FELICE e PETRILLO, 2012; CHUANG, 2010; OOKALKAR, JOSHI e OOKALKAR, 2009; YOUSEFINEZHADI et al, 2016).

Dentre as variações do método, destaca-se o PFMEA, voltado especificamente para a análise de falhas potenciais em processos de manufatura. A aplicação do PFMEA possibilita priorizar modos de falha que possam comprometer a realização ou o resultado final do processo produtivo, contribuindo diretamente para a melhoria da confiabilidade e da segurança (KOMATINA e MARINKOVIĆ, 2025).

Entretanto, o método apresenta limitações, especialmente no que diz respeito ao cálculo do *Risk Priority Number* (RPN) ou NPR, que atribui o mesmo peso aos fatores de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D). Esse aspecto pode dificultar a priorização das ações corretivas, já que modos de falha diferentes podem resultar em valores idênticos de RPN, mascarando a criticidade de cada risco (CHIOZZA e PONZETTI, 2009; YOUSEFINEZHADI et al, 2016).

O PFMEA tem como objetivos centrais: identificar modos potenciais de falha em processos; avaliar seus efeitos sobre o cliente e sobre o fluxo produtivo; quantificar e priorizar riscos; e propor ações que reduzam ocorrência, severidade ou melhorem a detecção. Fundamenta-se em princípios de trabalho em equipe, documentação padronizada e ciclo contínuo de melhoria (SILVESTRI, DE FELICE e PETRILLO, 2012; YOUSEFINEZHADI et al, 2016).

O PFMEA deve ser desenvolvido e mantido por uma equipe multidisciplinar, composta por representantes de todas as áreas interessadas no processo analisado. A participação ativa desses representantes é fundamental para garantir conhecimento abrangente do processo e identificar oportunidades de melhoria que, quando implementadas, podem eliminar ou reduzir a ocorrência de modos de falha (COLIN, 2007; DEGEN et al, 2010).



Como etapa inicial recomendada, deve-se elaborar o fluxograma do processo a ser avaliado, definindo claramente as etapas, interfaces e requisitos de cada operação. Com base nesse fluxograma, a equipe identifica, para cada etapa, os itens/funções, os modos potenciais de falha e os respectivos efeitos sobre o cliente, entendido tanto como usuário final quanto como a operação subsequente (MANUAL FMEA, 2008; MATTÉ et al, 2013).

O registro dos resultados é realizado em formulário padronizado de PFMEA, que reúne, para cada modo de falha, as causas potenciais, os efeitos, os controles existentes (preventivos e de detecção), as ações recomendadas, responsáveis e prazos. O preenchimento usualmente segue a ordem: Item/Função → Modo de Falha Potencial → Efeito Potencial → Causa → Controles Preventivos e de Detecção → Classificações (SILVESTRI, DE FELICE e PETRILLO, 2012; YOUSEFINEZHADI et al, 2016).

A avaliação do risco é feita por meio da atribuição de três índices: Severidade (S) Ocorrência (O) e Detecção (D), Cada índice é pontuado em uma escala de 1 a 10, sendo que a severidade mede a gravidade do efeito da falha, a ocorrência indica a probabilidade de que a causa gere o modo de falha e a detecção aponta o poder dos controles em identificar a falha antes que ela afete o cliente. O número de prioridade de risco NPR (ou RPN) é obtido pelo produto $S \times O \times D$ e serve para priorizar ações corretivas e preventivas (BUJNA et al, 2023).

O índice de severidade classifica o impacto de uma falha no cliente ou no processo, atribuindo notas de 1 a 10 conforme a gravidade das consequências. Quanto maior o valor, mais sério é o efeito: notas baixas indicam impactos mínimos ou facilmente contornáveis, enquanto notas intermediárias representam falhas que podem causar defeitos no produto, retrabalho ou interrupções de produção. Já os níveis mais altos refletem riscos críticos, como comprometimento da segurança, não conformidades severas ou falha total da função do produto, conforme o Quadro 1 (MATTÉ et al, 2013)



Quadro 1: índice de severidade

TABELA DE SEVERIDADE FMEA				
EFEITO	DFMEA	Classificação	EFEITO	PFMEA
	SEVERIDADE DO EFEITO NO PRODUTO (Efeito no cliente)			SEVERIDADE DO EFEITO NO PRODUTO (Efeito no cliente e Fabricação/ Montagem)
Falha em atender a requisitos de Segurança e/ou Regulatórios	Modo de falha afeta a operação segura do veículo e/ou envolve não conformidade com regulamentação governamental, sem prévio aviso.	10	Falha em atender a requisitos de segurança e/ou regulatórios	Pode trazer perigo ao operador (de máquina ou montagem) sem aviso prévio
	Modo de falha afeta a operação segura do veículo e/ou envolve não conformidade com regulamentação governamental, com prévio aviso.	9		Pode trazer perigo ao operador (de máquina ou montagem) com aviso prévio
Perda ou degradação de função primária	Perda da função primária (veículo inoperante, não afeta a operação segura do veículo).	8	Interrupção maior	100% dos produtos podem ser refugados. Parada da linha de produção ou embarque (expedição)
	Degradação da função primária (veículo operável, mas com desempenho reduzido).	7	Interrupção significante	Uma parcela do lote de produção pode ser refugada. Desvio do processo primário, incluindo velocidade reduzida da linha de produção e acréscimo de mão de obra.
Perda ou degradação da função secundária	Perda da função secundária (veículo operável, mas as funções de conforto/ conveniência estão inoperáveis).	6	Interrupção moderada	100% do lote de produção pode ser retrabalhado fora da linha e aceito.
	Perda da função secundária (veículo operável, mas funções de conforto/conveniência apresentam nível reduzido de desempenho).	5		Uma parcela do lote de produção pode ser retrabalhado fora da linha e aceito
Incômodo	Aparência ou ruído audível, veículo operável, não conformidade percebido pela maioria dos clientes (>75%).	4		100% do lote de produção pode ser retrabalhado na estação, antes de ser processado.
	Aparência ou ruído audível, veículo operável, não conformidade percebido por muitos clientes (>50%).	3	Uma parcela do lote de produção pode ser retrabalhado na estação, antes de ser processado.	
	Aparência ou ruído audível, veículo operável, não conformidade percebido clientes observadores (<25%).	2	Interrupção menor	Ligeira inconveniência para o processo, operação ou operador
Nenhum efeito	Nenhum efeito perceptível.	1	Nenhum efeito	Nenhum efeito perceptível

Fonte: Manual FMEA (2008)

O índice de ocorrência no FMEA indica a probabilidade de que uma falha venha a acontecer, usando uma escala geralmente de 1 a 10. Notas baixas representam falhas raras ou improváveis, normalmente associadas a processos estáveis e bem controlados, enquanto valores intermediários indicam falhas que podem ocorrer com certa frequência, exigindo atenção e melhoria. Já notas altas mostram que a falha ocorre repetidamente ou é difícil de controlar, tornando-se um ponto crítico no processo. Dessa forma, a tabela de ocorrência ajuda a medir o risco de repetição da falha e a priorizar ações que reduzam a frequência desses problemas como mostra o Quadro 2 (MATTÉ et al, 2013).

Quadro 2 – tabela de ocorrência

TABELA DE OCORRÊNCIA (DFMEA e PFMEA)		
PROBABILIDADE DE FALHAS	OCORRÊNCIA DA CAUSA (Incidente por item/ veículo) Projeto e Processo	ÍNDICE
Muito alta	≥ 100 por mil ou, > 1 em 10	10
Alta	50 por mil ou, 1 em 20	9
	20 por mil ou, 1 em 50	8
	10 por mil ou, 1 em 100	7
Moderada	2 por mil ou, 1 em 50	6
	0,5 por mil ou, 1 em 2000	5
	0,1 por mil ou, 1 em 10.000	4
Baixa	0,01 por mil ou, 1 por 100.000	3
	$\leq 0,001$ por mil ou, 1 em 1.000.000	2
Muito baixa	Falha eliminada através controle preventivo	1

Fonte: Manual FMEA (2008)

O índice de detecção no FMEA avalia a capacidade do processo de identificar uma falha antes que ela chegue ao cliente, utilizando uma escala de 1 a 10. Valores baixos indicam que os controles existentes são eficazes, com alta capacidade de detectar o problema rapidamente, enquanto notas intermediárias apontam controles razoáveis, porém não totalmente confiáveis. Já valores altos demonstram baixa capacidade de detecção, significando que a falha pode passar despercebida até etapas críticas ou até mesmo chegar ao cliente. Assim, a tabela de detecção ajuda a priorizar melhorias nos mecanismos de controle e inspeção, reduzindo o risco de falhas não identificadas no processo, conforme o Quadro 3 (MATTÉ et al, 2013).

Quadro 3 – tabela de detecção

TABELA DE DETECÇÃO		
CRITÉRIOS PROCESSO	CLASSIFICAÇÃO	PROBABILIDADE DE DETECÇÃO
PFMEA		
Nenhum controle de processo. Não se pode detectar, ou não é analisado.	10	Praticamente impossível
Modo de falha e/ou erro (causa) não é facilmente detectável (exemplo, auditorias aleatórias).	9	Muito remota
Deteção do modo de falha pós processamento, pelo operador, através de meios visuais/táteis/audíveis.	8	Remota
Deteção do modo de falha, na estação, pelo operador, através de meios visuais/táteis/audíveis, ou pós processamento, através do uso de medição por atributo (passa/não-passa, verificação de torque manual/por chave de estalo)	7	Muito baixa
Deteção do modo de falha, pós processamento, pelo operador, através do uso de medição por variável, ou na estação, pelo operador, através do uso de medição por atributo (passa/não-passa, verificação de torque manual/por chave de estalo)	6	Baixa
Deteção do modo de falha (causa) na estação, pelo operador, através do uso de medição por variável, ou por controles automáticos na estação, que detectarão peças discrepantes e notificarão o operador (luz, campanha)	5	Moderada
Deteção do modo de falha pós processamento, por controles automáticos, que detectarão peças discrepantes e travarão a peça, para impedir processamento subsequente	4	Moderadamente alta
Deteção do modo de falha na estação, por controles automáticos, que detectarão peças discrepantes e automaticamente travarão a peça na estação, para impedir processamento subsequente	3	Alta
Deteção de erro (causa), na estação, por controles automáticos, que detectarão o erro e impedirão que a peça discrepante seja produzida.	2	Muito alta
Prevenção do erro (causa) como resultado do projeto do dispositivo de fixação, projeto da máquina, ou projeto peça. Peças discrepantes não podem ser produzidas por que o item foi tornado à prova de erro, pelo projeto do processo/produto	1	

Fonte: Manual FMEA (2008)



As ações recomendadas devem priorizar, primeiramente, modos de falha com severidade crítica (valores 9–10), mesmo que o NPR seja baixo, devido ao risco potencial para a segurança do usuário. Em seguida, recomenda-se atuar sobre os NPR mais elevados (CHIOZZA e PONZETTI, 2009; YOUSEFINEZHADI et al, 2016). Cada ação deve ter responsável, prazo e registro de implementação; após sua efetivação, recalculam-se os índices para avaliar a redução do risco e documentar o novo NPR (FIBUCH e AHMED, 2014; YOUSEFINEZHADI et al, 2016).

$$\text{NPR} = \text{Severidade (S)} \times \text{Ocorrência(O)} \times \text{Detecção(D)}$$

De maneira sintética, as etapas práticas do PFMEA incluem: definição do escopo e formação da equipe; mapeamento do processo; identificação de funções e modos de falha; identificação de efeitos e causas; identificação de controles atuais; avaliação S-O-D e cálculo do NPR; definição e implementação de ações; e reavaliação e documentação. Essa sequência metodológica garante maior robustez e rastreabilidade ao processo (SHARMA, KUMAR e KUMAR, 2007; YOUSEFINEZHADI et al, 2016).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo aplicar a metodologia PFMEA para identificar falhas potenciais nos processos de corte a laser e router CNC (Comando Numérico Computadorizado) e propor melhorias que reduzam riscos, aumentem a confiabilidade e melhorem a qualidade das peças.

METODOLOGIA

Os estudos para aplicação do PFMEA foram realizados em uma empresa que atua com manufatura de termoplásticos, principalmente acrílico e policarbonato, tendo em seu processo de fabricação o corte e usinagem das chapas utilizando duas máquinas principais, uma máquina de corte a laser e uma Router CNC as quais tem apresentando ocorrências recorrentes de não conformidades de produtos relacionadas à precisão dimensional e ao acabamento superficial das peças, mostrado nas Figuras 1 e 2 abaixo.



Figura 1 – máquina de corte a laser



Fonte: O Autor

Figura 2 – máquina router CNC



Fonte: O Autor

Diante da reincidência desses problemas e do impacto negativo sobre a qualidade do produto final, a empresa identificou a necessidade de adotar uma metodologia sistemática de análise de riscos de falhas de processo, com o objetivo de melhorar o desempenho produtivo e assegurar a conformidade das peças fabricadas conforme os requisitos técnicos exigidos pelos clientes. Para

tal finalidade, foi escolhida a aplicação da ferramenta PFMEA, amplamente reconhecida por sua eficácia na identificação preventiva de falhas potenciais em processos industriais.

A primeira etapa do trabalho foi montar uma equipe multidisciplinar onde realizou-se um levantamento detalhado do processo produtivo, observando as operações realizadas nas máquinas de corte a laser e router. Essa análise envolveu o estudo de todas as fases, desde a preparação das chapas, a configuração e parametrização dos equipamentos, a execução do corte, até a etapa final de inspeção e acabamento.

Com base nas observações, elaborou-se um fluxograma do processo de fabricação, descrevendo de forma sequencial as operações e destacando os possíveis modos de falha em cada etapa, tais como falhas de fixação do material, desgaste de ferramentas, variações dimensionais, erros de programação e falhas de calibração como mostrado na Figura 3 abaixo.

Figura 3 – fluxograma do processo de corte a laser e router CNC



Fonte: O Autor

A partir das informações coletadas, foi elaborado o formulário de PFMEA, documento no qual foram registradas as etapas do processo, os modos e efeitos de falha, suas causas prováveis, bem



como os controles atualmente empregados e as classificações de ocorrência, severidade e detecção. A partir desses dados, tornou-se possível realizar a priorização dos riscos e, conseqüentemente, identificar as etapas que demandavam ações corretivas e preventivas imediatas de cada processo.

As ações recomendadas contemplaram melhorias nos procedimentos de setup e calibração das máquinas, otimização dos parâmetros de corte conforme o tipo de termoplástico processado, desenvolvimento de novos gabaritos de fixação, revisão dos métodos de detecção de falhas e implantação de listas de verificação para inspeção padronizada.

Durante a implementação das melhorias, foi conduzido um acompanhamento junto às equipes técnicas e produção, a fim de assegurar a execução adequada das ações propostas e a verificação dos resultados obtidos. Todas as medidas foram registradas em planos de ação contendo prazos definidos, responsáveis designados e indicadores de desempenho para avaliação de eficácia.

Após a aplicação das ações corretivas e preventivas, foi promovido um programa de treinamento e capacitação direcionado aos operadores, técnicos e gestores de produção, com o intuito de garantir a compreensão e a correta aplicação dos novos métodos e dispositivos implementados. Esse treinamento também visou reforçar a importância do monitoramento contínuo das variáveis críticas do processo e do registro sistemático das ocorrências.

Por fim, foi realizada uma análise crítica dos resultados obtidos por meio da aplicação do PFMEA, com o objetivo de verificar se a metodologia adotada contribuiu efetivamente para a redução das falhas identificadas, aumento da confiabilidade do processo e atendimento aos requisitos de qualidade estabelecidos pelos clientes. Essa etapa conclusiva permitiu avaliar a eficácia da implementação do PFMEA na realidade produtiva da empresa, confirmando seu potencial como ferramenta de melhoria contínua e prevenção de falhas no contexto da manufatura de termoplásticos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das informações levantadas foi feita uma análise para o plano de ação das atividades previstas. Depois disso foi definido que, nesse primeiro momento, seriam avaliados todos os itens com NPR acima de 80 pontos, como linha de corte definida pela empresa, a fim de recomendar ações de melhoria e mensurar o resultado esperado numa primeira rodada de ações, como mostram os Quadros 4 e 5 abaixo.

Quadro 4 – tabela Efeito, Causa, Controles, S, O, D e NPR processo corte a laser

Etapa do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial da Falha	Causa Potencial da Falha	Controles Atuais	S	O	D	NPR	Ação Recomendada
Recebimento da chapa	Chapa com defeito (empenada ou com riscos)	Corte irregular ou peça fora de tolerância	Falha na inspeção do material recebido	Inspeção visual	7	3	4	84	Implementar checklist de recebimento e registro fotográfico se tiver defeitos
Nivelamento da mesa	Mesa de nivelada	Corte desigual / impreciso	Falta de calibração ou ajuste inadequado	Nivelamento com régua de precisão quando percebe o desnível	6	3	5	90	Criar rotina de calibração com registro semanal
Ajuste de foco do laser	Foco incorreto	Corte incompleto / queima do material	Erro do operador / lente suja	Limpeza diária da lente e gabarito de altura da caneta	8	4	5	160	Adotar sensor automático de foco e sistema de alerta
Parametrização do programa	Parâmetros incorretos (potência, velocidade)	Corte com rebarba / peça fora da dimensão	Falha humana / uso de parâmetros inadequados	Revisão pelo operador	7	3	4	84	Padronizar parâmetros por tipo de chapa
Acionamento do exaustor	Exaustão ineficiente	Acúmulo de fumaça / falhas no corte	Filtro saturado ou falha elétrica	Manutenção corretiva e monitoramento visual	6	2	4	48	Programar manutenção preventiva e troca de filtro mensal
Corte	Interrupção do feixe / falha de corte	Peça incompleta / sucata	Falha no compressor / obstrução do bico / falha laser	Manutenção corretiva / monitoramento de fluxo de ar	9	3	3	81	Incluir sensor de fluxo de ar e alarme de falha
Remoção da peça	Dano na peça durante retirada	Arranhões ou deformação	Falta de cuidado na retirada	Treinamento de manuseio	5	3	5	75	Implantar instruções de manuseio
Inspeção da peça	Falha na identificação de defeitos	Peça não conforme enviada para o cliente	Falha humana / inspeção visual ineficiente	Inspeção visual e medição dimensional	8	2	4	64	Criar checklist de inspeção e controle por amostragem

Fonte: O Autor

Quadro 5 – tabela Efeito, Causa, Controles, S, O, D e NPR processo router CNC

Etapa do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial da Falha	Causa Potencial da Falha	Controles Atuais	S	O	D	NPR	Ação Recomendada
Recebimento da chapa	Chapa com defeito (empenada ou com riscos)	Corte irregular ou peça fora de tolerância	Falha na inspeção do material recebido	Inspeção visual	6	3	4	72	Implementar checklist de recebimento e registro fotográfico se tiver defeitos
Fixação da chapa	Fixação insuficiente	Peça solta / desvio dimensional	Vácuo ineficiente / erro humano	Verificação da pressão de vácuo antes do corte	9	3	5	135	Instalar sensor de vácuo e checklist de fixação
Parametrização do CAM	Programação incorreta	Dimensões incorretas / rebarbas	Erro humano ou falha de conversão de arquivo	Revisão do programa CAM pelo operador	8	3	4	96	Implementar simulação prévia do percurso
Referência X/Y/Z	Referência incorreta	Corte de salinhado	Falha de calibração ou erro humano	Verificação de origem antes do início	7	3	5	105	Implantar rotina automática de zeramento
Acionamento exaustão/ aspiração	Aspiração ineficiente	Acúmulo de resíduos / falha no corte	Filtro sujo / mangueira obstruída	Manutenção corretiva	5	3	4	60	Programar manutenção preventiva e troca de filtro mensal
Remoção da peça	Dano na borda / arranhões	Peça rejeitada	Falta de cuidado na retirada	Treinamento de manuseio	5	3	5	75	Implantar instruções de manuseio
Acabamento	Rebarbas/ bordas irregulares	Peça fora de padrão estético	Ferramenta desgastada	Controle de vida útil das fresas	6	4	4	96	Implementar plano de troca preventiva de fresas
Inspeção da peça	Falha na identificação de defeitos	Peça não conforme enviada para o cliente	Falha humana / inspeção visual ineficiente	Inspeção visual e medição dimensional	8	2	4	64	Criar checklist de inspeção e controle por amostragem

Fonte: O Autor

Esse procedimento não elimina as falhas, mas ajusta os problemas com maior incidência para que possa reduzir o seu índice de severidade, possibilitando em uma próxima rodada a abordagem de outros itens onde também serão ajustados ao longo do processo. Isso cria um sistema de melhoria em ciclos a partir das maiores prioridades.



Sendo assim, os processos que passaram de 80 pontos tiveram suas ações implementadas, gerando novos NPRs, conforme sequência a seguir:

1) Recebimento da chapa – NPR 84 (Corte a laser)

- Falha: Chapa com defeito (empenada ou com riscos);
- Causa: Falha na inspeção do material recebido;
- Ação recomendada: Implementar checklist de recebimento e registro fotográfico se houver defeitos.

Após a melhoria a implementação do checklist padroniza a inspeção e o registro fotográfico garante a rastreabilidade e documenta a frequência da ocorrência. O efeito da ação é a diminuição da ocorrência (O), pois as falhas passam a ser detectadas logo na entrada da chapa. Novo NPR estimado: S=7, O=2, D=3 – NPR=42.

2) Nivelamento da mesa – NPR 90 (Corte a laser)

- Falha: Mesa desnivelada;
- Causa: Falta de calibração ou ajuste inadequado;
- Ação recomendada: Criar rotina de calibração com registro semanal.

Após a melhoria a rotina de calibração periódica evita desvios acumulados, diminui fortemente a ocorrência (O) e melhora a detecção (D). O novo cenário estimado é: S=6, O=2, D=2 – NPR=24.

3) Ajuste de foco do laser – NPR 160 (Corte a laser)

- Falha: Foco incorreto;
- Causa: Erro do operador / falta de calibração;
- Ação recomendada: Adotar sensor automático de foco e sistema de alerta.

Após a melhoria o ajuste do foco deixa de depender do operador, tornando o processo automatizado e repetitivo, tendo como efeito a redução drástica da ocorrência (O) e melhora na detecção (D). Seu novo NPR estimado passa a ser: S=8, O=2, D=2 – NPR=32.

4) Parametrização do programa – NPR 84 (Corte a laser)

- Falha: Parâmetros incorretos (potência, velocidade)
- Causa: Falha humana / uso de parâmetros inadequados
- Ação recomendada: Padronizar parâmetros por tipo de chapa



Após a melhoria a padronização reduz erros manuais e variações entre operadores diminuindo a ocorrência (O) e melhora sua detecção (D) pois o sistema passa a seguir padrões fixos. Novo cenário: S=7, O=2, D=2 – NPR=28.

5) Corte – NPR 81 (Corte a laser)

- Falha: Interrupção do feixe / falha de corte;
- Causa: Mau compressor ou obstrução do bico;
- Ação recomendada: Incluir sensor de fluxo de ar e alarme de falha.

Após a melhoria o sensor detecta imediatamente falhas no fluxo evitando perdas de produção, seus efeitos são a redução da ocorrência e do índice de detecção. Seu novo cenário estimado: S=6, O=2, D=2 – NPR=24.

6) Fixação da chapa – NPR 135 (Router CNC)

- Falha: Fixação insuficiente;
- Causa: Vácuo insuficiente, erro humano;
- Ação recomendada: Instalar sensor de vácuo e checklist de fixação.

Após a melhoria de instalação de um sensor de vácuo as falhas por perda de pressão são eliminadas, reduzindo a ocorrência (O) e o checklist de fixação reduz os erros humanos diminuindo os índices de detecção (D). O novo NPR estimado é: S=6, O=2, D=2 – NPR=24.

7) Parametrização do CAM (Router CNC)

- Falha: Programação incorreta;
- Causa: Erro humano ou falha na conversão de arquivo;
- Ação recomendada: Implementar simulação prévia do percurso.

Após a melhoria com a simulação do software CAM é possível detectar erros antes da execução real, reduzindo a ocorrência (O) e melhorando a detecção (D). Novo NPR estimado: S=8, O=2, D=2 – NPR=32.

8) Referência X/Y/Z (Router CNC)

- Falha: Referência incorreta;
- Causa: Falha de calibração ou erro humano;
- Ação recomendada: Implantar rotina automática de zeramento.



Após a melhoria, o zeramento automático elimina a dependência do operador e garante repetibilidade, reduzindo a ocorrência (O) e melhorando a detecção (D). Seu novo cenário estimado passa a ser: S=7, O=2, D=2 – NPR=28.

9) Acabamento (Router CNC)

- Falha: Rebarbas/bordas irregulares;
- Causa: Ferramenta desgastada;
- Ação recomendada: Implementar plano de troca preventiva de fresas.

Após a melhoria a manutenção preventiva garante ferramentas em bom estado e reduz a ocorrência (O) assim como melhora a detecção (D) já que haverá controle do ciclo de vida das fresas. Seu novo NPR: S=6, O=2, D=2 – NPR=24.

A análise dos itens com NPR acima de 80 pontos permitiu direcionar esforços para as falhas de maior criticidade, resultando em ações de melhoria capazes de reduzir os riscos associados aos processos de corte a laser e router CNC. As melhorias implementadas demonstraram eficácia ao diminuir os índices de ocorrência e melhorar a detecção das falhas, refletindo em novos NPRs menores. Dessa forma, pode-se afirmar que a aplicação estruturada do PFMEA fortalece o controle do processo, reduz desperdícios e estabelece um ciclo contínuo de melhoria, criando uma base para que futuras etapas do processo também sejam analisadas e aprimoradas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a implementação das melhorias propostas, o processo de corte a laser e router CNC tornam-se fortemente estáveis e previsíveis. Há uma redução significativa dos riscos potenciais de falha, menor custo com retrabalho, maior precisão dimensional e melhoria na qualidade final das peças.

Os índices que estavam com NPR acima de 80 tiveram uma redução média de 70% ficando na média com 29 pontos, como mostrado nos Quadros 6 e 7 abaixo:

Quadro 6 – resumo resultados esperados NPR processo corte a laser

Etapa	NPR Antes	NPR Após	Redução Estimada	Benefício Principal
Recebimento da chapa	84	42	-50%	Inspeção mais confiável
Nivelamento da mesa	90	24	-73%	Corte mais preciso
Ajuste de foco	160	32	-80%	Estabilidade e automação
Parametrização do programa	84	28	-67%	Padronização do processo
Corte	81	24	-70%	Redução de falhas de corte

Fonte: O Autor

Quadro 7 – resumo resultados esperados NPR processo router CNC

Etapa	NPR Antes	NPR Após Melhoria	Redução (%)	Impacto
Fixação da chapa	135	24	-82%	Alta confiabilidade dimensional
Parametrização CAM	96	32	-67%	Erros de programação praticamente eliminados
Referência X/Y/Z	105	28	-73%	Precisão de corte e repetibilidade asseguradas
Acabamento	90	24	-73%	Padrão estético garantido e menos retrabalho

Fonte: O Autor

Esses índices deixaram de ser críticos, mostrando que o PFMEA não tem num primeiro momento o objetivo de eliminar a falha, mas sim reduzir a chance dela ocorrer e a cada rodada passa a ter novos pontos a serem avaliados tornando esse processo cíclico e de melhoria contínua.

REFERÊNCIAS

BUJNA, M. et al. New possibilities of using DEMATEL and ERPN in the new PFMEA hybrid model. Applied Sciences, v. 13, n. 3627, p. 1–21, 2023. DOI: 10.3390/app13063627.

CHIOZZA, M. L.; PONZETTI, C. FMEA: A Model for Reducing Medical Errors. Clinica Chimica Acta; International Journal of Clinical Chemistry, 2009.

CHUANG, P.-T. Incorporating Disservice Analysis to Enhance Perceived Service Quality. Industrial Management & Data Systems, 2010.

COLIN, E. Pesquisa Operacional. S. Paulo: LTC, 2007.



DEGEN, Eduardo de Azevedo; BORCHARDT, Miriam; PEREIRA, Giancarlo Medeiros; SELLITTO, Miguel Afonso. Proposta de um método para avaliação de riscos em FMEA considerando o custo de ocorrência do modo de falha. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, São Carlos/SP, 2010.

FIBUCH, E.; AHMED, A. The Role of Failure Mode and Effects Analysis in Health Care. *PhysicianExecutive*, 40(4), 28–32. 2014 Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=97122572&site=ehost-live>.

KOMATINA, N.; MARINKOVIĆ, D. Optimization of PFMEA team composition in the automotive industry using the IPF-RADAR approach. *Algorithms*, v. 18, n. 342, p. 1–18, 2025. DOI: 10.3390/a18060342.

KREJCI, Lucie et al. The Application of PFMEA for Roller Bearings Production. *Manufacturing Technology*, v. 19, n. 3, p. 439-445, 2019.

MANUAL FMEA, Análise dos modos de falha e seus efeitos de falha potencial – FMEA: Manual de Referência. 4. ed. São Paulo: I.Q.A., 2008.

MATTÉ, Elton; NEGRI, Gabriela; CARBONERA, Maicon Zanin; FREDDO, Raissa Clecy. Aplicação da ferramenta de FMEA em um estudo de caso: FMEA de processo produtivo do mancal 01241. APS – Engenharia de Produção, 2013.

OOKALKAR, a. D.; JOSHI, A. G.; OOKALKAR, D. S. Quality Improvement in Haemodialysis Process Using FMEA. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2009.

SHARMA, R. K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Modeling and Analysing System Failure Behaviour Using RCA, FMEA and NHPPP Models. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2007.

SILVESTRI, A.; DE FELICE, F.; PETRILLO, A. Multi-Criteria Risk Analysis to Improve Safety in Manufacturing Systems. *International Journal of Production Research*, 2012.

YOUSEFINEZHADI, T.; NOBARI, F. A. J.; GOODARI, F. B.; ARAB, M. A case study on improving intensive care unit (ICU) services reliability: By using process failure mode and effects analysis (PFMEA). *Global Journal of Health Science*, v. 8, n. 9, p. 207–218, 2016. DOI: 10.5539/gjhs.v8n9p207.