

# Coleta de medições 3D confiáveis A abordagem de metrologia 3D inteligente



Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

## Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

Estudos de repetibilidade

Estudos Gauge R&R

Recomendações para metrologistas

Conclusão

# Coleta de medições 3D confiáveis

## A abordagem de metrologia 3D inteligente

As empresas de manufatura monitoram a qualidade do produto todos os dias, coletando dados de medição dimensional. Esses dados são usados para investigar a estabilidade de um processo de fabricação, determinar a capacidade do processo de garantir a qualidade e a funcionalidade da peça, e estabelecer índices para quantificar a capacidade do processo de atender a requisitos dimensionais. Tudo faz parte de seu processo de melhoria contínua.

Ao introduzir um novo processo de fabricação, podem ser percebidos problemas com a estabilidade do processo sem que seja possível identificar a causa exata e corrigi-la. Esses problemas, em alguns casos, não são relacionados ao processo de fabricação, mas ao próprio sistema de medição.

Os metrologistas sabem que uma medição nunca é exata. Muitas fontes de variação afetam o desempenho do sistema de medição, levando a incertezas nesse sistema. Ao realizar uma Análise do Sistema de Medição (MSA) por meio de estudos de repetibilidade e Gauge R&R, é possível estimar a variação do sistema de medição. Esses estudos permitem que os metrologistas avaliem a validade do sistema de medição e minimizem os fatores que contribuem para a variação total medida do processo que realmente decorre do sistema de medição.

Um estudo MSA pode ser bastante complexo para configurar e executar - ainda mais no contexto da metrologia 3D - e requer amplo conhecimento de estatística para obter dados acionáveis.

### Este livro branco vai:

- Explicar os conceitos-chave de análise de sistema de medição e sua aplicação prática para dispositivos de medição 3D,
- Explorar um processo totalmente digital desde a configuração e execução de estudos de repetibilidade e Gauge R&R para obter resultados diretamente no Excel para análise e compartilhamento, e
- Oferecer, aos metrologistas, recomendações para analisar os resultados do estudo



Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

### Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

### Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

### Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

- Estudos de repetibilidade
- Estudos Gauge R&R

### Recomendações para metrologistas

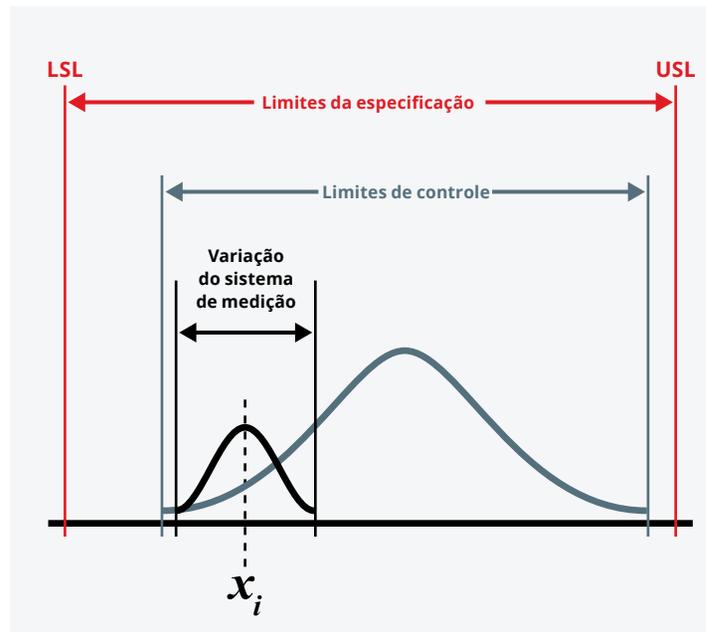
### Conclusão

# Entendimento dos fundamentos de MSA

Vamos examinar o papel crucial da MSA no contexto do processo geral de inspeção de peças. Durante esse processo, os metrologistas medem *características-chave*, como tamanho, dimensões, posições, perfis e orientações, para determinar seu desvio de especificações nominais. Eles avaliam o cumprimento das especificações técnicas, conforme estabelecido no plano de controle, por meio de tolerâncias e requisitos. Toda medição é caracterizada por dois componentes principais: um que representa o desvio real (ou seja, valor real) e outro que reflete a variabilidade do sistema de medição. Para garantir que seu sistema de medição seja estável e confiável para a tarefa, os metrologistas precisam identificar a amplitude da variação do sistema de medição e garantir que ela represente, no máximo, entre 10% e 30% dos limites de especificação. A variabilidade ou desempenho do sistema de medição devem ser proporcionalmente pequenos o suficiente para que não contribuam significativamente para a variação total medida do processo, considerando tanto o processo de fabricação quanto o sistema de medição, e não forcem o processo acima dos limites de especificação (*LSL, USL*) ou tolerâncias.

**Figura 1**  
Desempenho de um sistema de medição em relação à variação total do processo

A figura 1 mostra essa interação, em que o desempenho de um sistema de medição e os valores medidos ( $x_i$ ) tem uma contribuição relativamente discreta e previsível para a variação medida do processo. Essa variação é obtida a partir dos resultados medidos em peças que vêm da linha de produção, usando técnicas de CEP. Normalmente, os limites de controle são calculados usando esses dados. Em outras palavras, o desempenho do sistema de medição afeta os resultados da variação total medida do processo, e o fluxo de trabalho de análise do sistema de medição ajuda a identificar esse desempenho.



Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

## Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

- Estudos de repetibilidade
- Estudos Gauge R&R

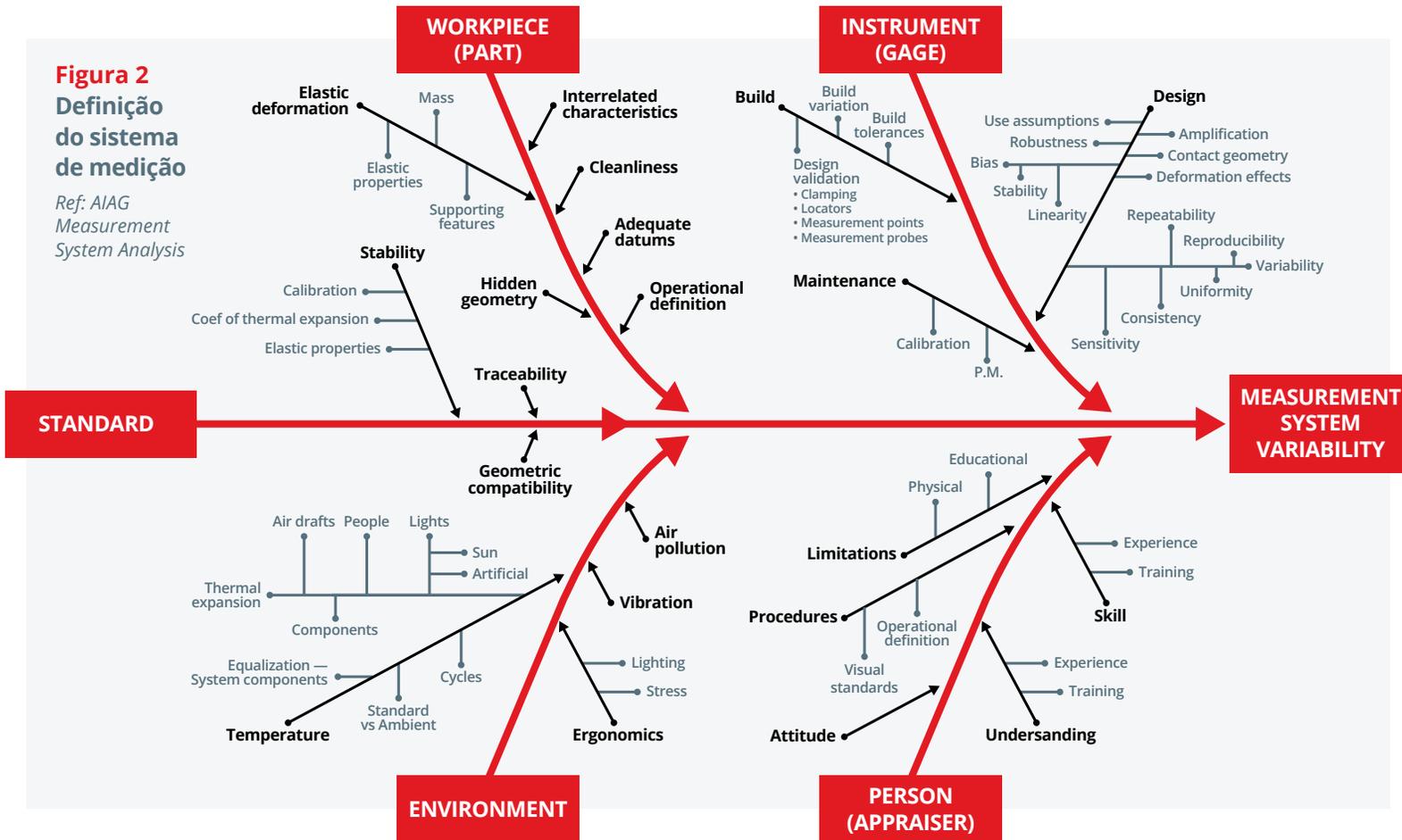
Recomendações para metrologistas

Conclusão

## Definição do sistema de medição

Antes de determinar o desempenho do sistema de medição, é fundamental identificar todas as fontes potenciais de variação que podem afetar o processo de medição de uma característica-chave. O [Automotive Industry Action Group \(AIAG\)](#) afirma que o sistema de medição é composto pela "coleção de instrumentos ou medidores, padrões, operações, métodos, dispositivos de fixação, software, pessoal, ambiente e premissas

usadas para quantificar uma unidade de medida ou corrigir a avaliação para a característica da entidade que está sendo medida; o processo completo usado para obter medições". A MSA deve considerar todos esses fatores, conforme detalhado na Figura 2, pois eles influenciam a incerteza geral do sistema de medição.



Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

Estudos de repetibilidade

Estudos Gauge R&R

Recomendações para metrologistas

Conclusão

## Índices de desempenho do sistema de medição

O desempenho de um sistema de medição é determinado usando índices que categorizam e quantificam a incerteza da medição. Ao coletar dados sobre o processo, o metrologista pode quantificar a variabilidade total da medição determinando um comportamento específico associado a ela. Geralmente, esse comportamento é descrito como uma variável aleatória (VA) com distribuição gaussiana (normal). A Figura 3 ilustra esse conceito, com a curva preta representando os dados coletados, ou seja, os valores medidos provenientes do processo de medição, e sua distribuição definida pelos parâmetros de localização (*média*) e largura (*desvio padrão*).

Os vários fatores que afetam o processo de medição representam várias fontes de incerteza que são sistemáticas (*por exemplo, valor médio de medição x valor real*) ou aleatórias (*por exemplo, dispersão de medições*). É possível categorizar essas incertezas dependendo do efeito que elas têm em parâmetros de distribuição identificados. Conforme ilustrado na Figura 4, a incerteza sistemática inclui viés, linearidade e estabilidade, enquanto a incerteza aleatória inclui repetibilidade e reprodutibilidade. Cada categoria é claramente identificável por seu padrão de distribuição único.

Figura 3  
Distribuição gaussiana

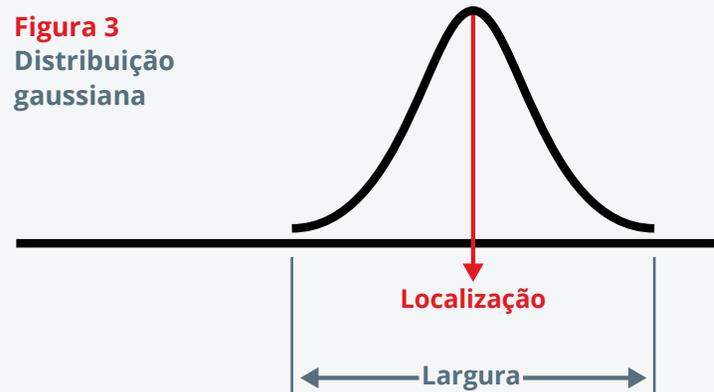
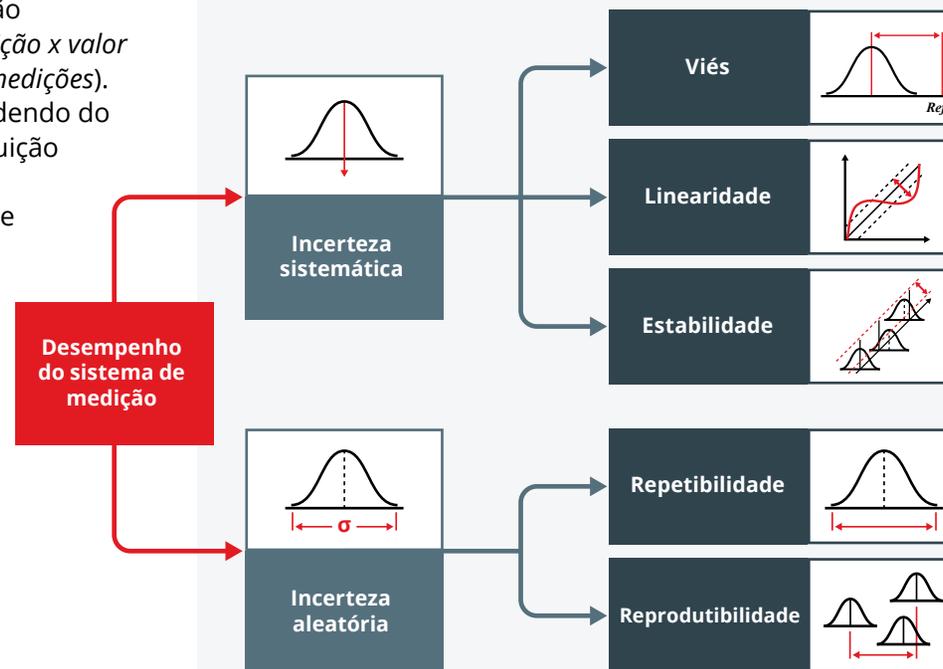


Figura 4  
Índices de desempenho



Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

Estudos de repetibilidade

Estudos Gauge R&R

Recomendações para metrologistas

Conclusão

## • Incerteza sistemática

A incerteza sistemática é a incerteza na medição fortemente associada à posição da distribuição normal em relação a uma referência conhecida. Matematicamente, ela influencia o valor médio dos dados medidos. O termo comum para isso é *erro de acurácia*. O erro de acurácia representa a exatidão entre a média de um ou mais resultados medidos e um valor de referência. O erro de acurácia é geralmente reprodutível e geralmente é devido a problemas que podem ser quantificados e corrigidos. Os três tipos de incerteza sistemática mais comuns são viés, linearidade e estabilidade, sendo que viés é o mais comum. O *viés* representa a distância entre a média de um ou mais resultados medidos ( $\bar{x}$ ) e um valor de referência (*Ref*). Matematicamente, o viés é estimado pela diferença entre o valor real (valor *Ref*) e a média observada de medições na mesma característica da mesma peça. A *linearidade*, por outro lado, indica até que ponto os dados coletados em toda a faixa de medição de um instrumento correspondem bem ao valor de referência. É a diferença de viés em toda a faixa de medição pretendida do equipamento. A *linearidade* representa a mudança no viés de um extremo da faixa de medição para o outro. O último tipo de incerteza sistemática é a *estabilidade*. Representa a capacidade de um sistema de medição de manter sua capacidade metrológica ao longo do tempo. A estabilidade descreve a variação do viés ao longo do tempo, geralmente o tempo entre duas calibrações do sistema.



## • Incerteza aleatória

A fonte restante de incerteza de medição é a incerteza aleatória, comumente chamada de *erro de precisão*. O erro de precisão representa as flutuações estatísticas nos dados medidos devido às limitações do sistema de medição. O erro de precisão descreve a variação esperada de medições repetidas ao longo da faixa de medição. Os dois tipos de incerteza aleatória são repetibilidade e reprodutibilidade. *Repetibilidade* representa a amplitude da dispersão de medições obtidas em um conjunto de condições muito controladas. Ela descreve a capacidade do sistema de obter a mesma medição, com o mesmo equipamento, peça, template e as mesmas condições ambientais. Uma distribuição estreita indica uma medição mais repetível. *Reprodutibilidade* representa a variação entre medições feitas por operadores diferentes, com o mesmo equipamento e nas mesmas condições. Matematicamente, é a variação da média das leituras feitas por cada um dos operadores.

Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

- Estudos de repetibilidade
- Estudos Gauge R&R

Recomendações para metrologistas

Conclusão

## Capacidade e desempenho do sistema de medição

A capacidade de um sistema de medição ( $\sigma_{capacidade}$ ), também chamada de incerteza padrão total, é a combinação de todas as incertezas sistemáticas e aleatórias. Ela quantifica a dúvida associada a uma medição em condições conhecidas e é usada para identificar a incerteza total do sistema de medição em um curto período. A capacidade pode ser calculada usando a fórmula:

$$\sigma_{capacidade}^2 = \sigma_{Viés (linearidade)}^2 + \sigma_{R\&R}^2$$

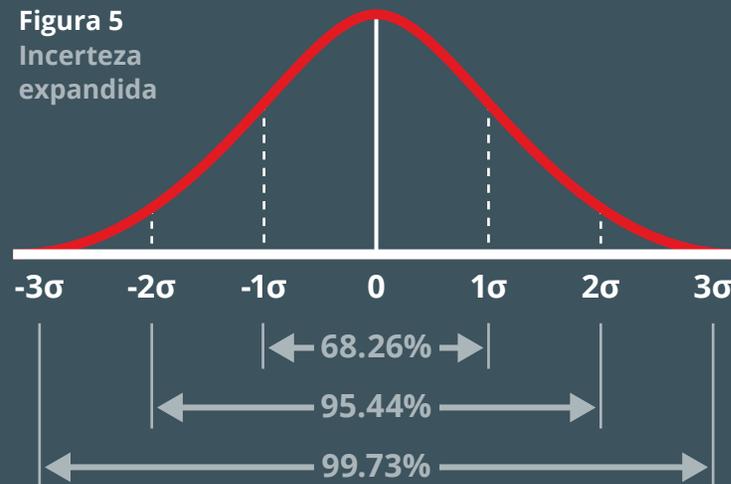
O desempenho, por outro lado, considera não apenas as fontes de variações sistemáticas e aleatórias, mas também as fontes de desvio que ocorrem ao longo do tempo. Ele é calculado usando a fórmula:

$$\sigma_{desempenho}^2 = \sigma_{capacidade}^2 + \sigma_{estabilidade}^2$$

## Incerteza expandida

A etapa final do processo de Análise do Sistema de Medição determina a *incerteza expandida* ( $U$ ) associada ao sistema de medição. A incerteza expandida representa o valor total da incerteza de medição que descreve, dentro de um nível de confiança específico, a faixa esperada para conter o resultado *real* da medição obtido por um sistema. Pode ser expresso como:  $U = \pm K\sigma_{tot}$  em que  $U$  é a incerteza expandida,  $K$  é o fator de cobertura que representa a área sob a curva normal para um nível de confiança desejado (por exemplo,  $K=3$  para um nível de confiança de 99,73%) e  $\sigma_{tot}$  é a incerteza padrão total do sistema de medição que normalmente corresponde ao seu desempenho. Os fatores de confiança mais comumente usados durante a análise do sistema de medição são encontrados na figura abaixo.

Figura 5  
Incerteza expandida



Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

### Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

- Estudos de repetibilidade
- Estudos Gauge R&R

Recomendações para metrologistas

Conclusão

# Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Para avaliar a incerteza de medição de um sistema, primeiro é necessário definir seu modelo de medição. Esse modelo é a representação matemática da relação entre a quantidade de saída do sistema de medição e as quantidades de entrada conhecidas envolvidas no processo de medição. Existem dois tipos de medição: direta e indireta, e isso vai afetar como o modelo é definido. Medição direta é quando um dispositivo de medição fornece diretamente a quantidade de saída. Por exemplo, um diâmetro externo ( $Y$ ) é medido usando um micrômetro, que fornece diretamente o valor físico  $X$ . Nesse caso, o modelo de medição (ou seja, função) é identificado como  $Y=X$ . No entanto, a maioria dos dispositivos de medição 3D realizam medição indireta. Eles não podem fornecer diretamente o valor ( $Y$ ), mas sim considerar uma função de vários ( $n$ ) valores físicos ( $X_i$ ),  $Y=f(X_1, \dots, X_n)$ . Por exemplo, uma máquina de medição tridimensional portátil usa a posição e orientação de vários codificadores para obter uma saída específica. Esses valores físicos, neste exemplo a posição e a orientação dos codificadores para calcular a quantidade de saída, são todos afetados por uma incerteza de medição específica ( $u_{x_i}$ ). Portanto, o resultado medido dado pelo braço ( $Y$ ) é dependente do conjunto de valores ( $X_i$ ) e das incertezas associadas ( $u_{x_i}$ ) utilizadas para sua estimativa. Em última análise, o valor medido ( $Y$ ) também tem uma incerteza total ( $u_y$ ).

Se o modelo que representa o sistema de medição for formulado explicitamente, ele pode ser usado para propagar as incertezas das grandezas de entrada para as grandezas de saída usando duas estratégias: uma série de Taylor ou uma simulação de Monte Carlo. Essas estratégias são abordadas em profundidade em publicações como o [Guia para a expressão da incerteza na medição](#) (GUM)<sup>1</sup>. Por outro lado, **se o modelo for muito complexo para ser formulado explicitamente ou quando os parâmetros forem desconhecidos, deve ser utilizada uma estratégia experimental**. Analisando a quantidade de saída usando ferramentas estatísticas, é possível estimar a incerteza total do sistema de medição. Por exemplo, em uma situação em que um metrologista usa uma máquina de medição tridimensional portátil com um scanner para medir um perfil de superfície, a função de medição é muito mais complexa de identificar. Nesse caso, a análise experimental deve ser utilizada. Como é feito diretamente no resultado da medição, o metrologista não precisa desmembrar todo o sistema de medição, tornando-o mais simples, mais direto e mais fácil de entender.

<sup>1</sup> Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão da incerteza na medição (JCGM 100:2008) publicado pelo Bureau International des Poids et Mesures

Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

## Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

## Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

## Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

Estudos de repetibilidade

Estudos Gauge R&R

## Recomendações para metrologistas

## Conclusão

# Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

Realizar uma análise experimental para determinar a incerteza expandida de sistemas de medição 3D complexos requer primeiro a realização de um estudo de repetibilidade seguido por um estudo completo de Gauge R&R. Ao coletar dados sobre os resultados de medição do sistema usando diferentes configurações e testes, o metrologista pode estimar a variação total usando os índices de desempenho descritos anteriormente. Mas esses estudos são tradicionalmente complexos de realizar e exigem amplo conhecimento de estatística para obter resultados adequados.

**Figura 6**  
PolyWorks MSA barra de ferramentas



O PolyWorks® oferece uma solução integrada de software de metrologia 3D inteligente MSA para a realização de estudos de sistemas complexos de medição 3D dentro de um processo totalmente digital. Ele permite que o usuário:

- 1 Especifique as características-chave exigidas pelo plano de controle;
- 2 Crie o estudo selecionando seu tipo e definindo parâmetros-chave, essenciais para o controle de qualidade e a rastreabilidade;
- 3 Execute o estudo realizando a aquisição de dados para todas as configurações de dispositivos de medição 3D e contextos de medição, dentro de uma única plataforma de software universal;
- 4 Produza relatórios ricos em informações publicados diretamente no Microsoft Excel com planilhas pré-formatadas vinculadas a dados de inspeção 3D inteligente; e
- 5 Realize análises sofisticadas em Excel sem a necessidade de conhecimentos avançados em aplicativos de software estatístico.

Desde a configuração dos estudos até a aquisição das medições e os resultados gerados automaticamente, como índices e gráficos, a solução PolyWorks MSA garante que todos os cálculos sejam realizados dentro de um ecossistema de software, e a cadeia totalmente digital garante a integridade dos dados e resultados confiáveis.

Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

## Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

Estudos de repetibilidade

Estudos Gauge R&R

Recomendações para metrologistas

Conclusão

## Estudos de repetibilidade



O primeiro passo na condução de uma análise do sistema de medição é um estudo de repetibilidade. Ele avalia a variabilidade dos sistemas de medição (variação dos equipamentos) quando afetados por um número mínimo de fontes de variação. Ele é usado durante a

avaliação inicial de um sistema de medição para comparar rapidamente diferentes configurações do sistema, como os locais de fixação do dispositivo ou os parâmetros do hardware de metrologia.

O estudo de repetibilidade é realizado:

- 1 - Colocando-se uma peça em um dispositivo de fixação (quando aplicável);
- 2 - Medindo-se a peça usando um dispositivo de medição 3D;
- 3 - Retirando-se a peça do dispositivo de fixação; e
- 4 - Repetindo-se esses passos de uma a três vezes, sempre usando-se a mesma peça, dispositivo de fixação e dispositivo de medição.

Usando o plano de controle, o metrologista identifica as principais características sobre as quais a análise estatística deve ser feita. A peça é medida pelo menos 10 vezes, mas geralmente pelo menos 30 vezes, para se obter uma boa estimativa da variação do equipamento. Esse tipo de estudo geralmente é realizado por um metrologista sênior que possui a experiência necessária para detectar rapidamente problemas no processo de medição e resolvê-los com facilidade.

Existem dois tipos de estudos de repetibilidade:

### Estudo Gauge Tipo 1<sup>2</sup>:

- Avalia o efeito do viés e da repetibilidade na medição
- Exige uma referência certificada de dimensões conhecidas
- Duas métricas de saída: Cg e Cgk
- Aplica-se quando uma referência certificada está disponível e a estabilidade do sistema de medição não é uma preocupação

### Estudo Gauge R<sup>3</sup> :

- Avalia a repetibilidade e a estabilidade do sistema de medição
- Não exige referência certificada
- Usa o gráfico I-MR como base para a avaliação de variação e estabilidade

A principal diferença entre eles é que o estudo Tipo 1 precisa de uma referência certificada para ajudar a identificar um possível viés e não avalia a estabilidade do sistema de medição.

**Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente**

### Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

**Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos**

**Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente**

Estudos de repetibilidade

Estudos Gauge R&R

**Recomendações para metrologistas**

**Conclusão**

<sup>2</sup> Requisitos de Análise do Sistema de Medição para a Cadeia de Suprimentos de Motores Aeronáuticos (AS13003) publicados pela SAE International.

<sup>3</sup> Análise do Sistema de Medição (MSA) publicada pelo Automotive Industry Action Group (AIAG).

Ambos os estudos de repetibilidade são facilitados pela solução PolyWorks MSA:

- 1 - O metrologista é orientado passo a passo nas etapas necessárias do estudo com a criação de um projeto de inspeção completo com todas as medições necessárias, suas características, controles e métricas de saída, bem como o número de peças a serem medidas, garantindo um modelo de medição robusto.
- 2 - Em seguida, os operadores são orientados por instruções na tela e mostradores 3D durante a aquisição da medição.
- 3 - Quando o processo de aquisição de medição estiver concluído, os resultados da inspeção são publicados automaticamente em planilhas Excel pré-formatadas que são dinamicamente vinculadas aos dados de inspeção 3D do projeto de inspeção.
- 4 - As planilhas pré-formatadas fornecem ao metrologista a variação do equipamento calculada automaticamente e pronta para análise, ou seja, repetibilidade, índices de desempenho e gráficos.
- 5 - Para concluir essa análise e otimizar rapidamente o processo de medição, o metrologista pode ajustar os parâmetros de medição no projeto de inspeção e ver sua influência direta na variação do equipamento, com o PolyWorks atualizando automaticamente o índice da planilha e os valores do gráfico.

## Estudos Gauge R&R

Embora os estudos de repetibilidade permitam analisar e otimizar a variação do equipamento do sistema de medição, são necessários estudos de repetibilidade e reprodutibilidade do medidor, ou estudos de Gauge R&R, para concluir a validação final de um sistema de medição.

Estudos Gauge R&R geralmente são executados após estudos de repetibilidade, pois exigem mais recursos, peças e custos. Além disso, fazendo primeiro um estudo de repetibilidade, o metrologista pode corrigir a variação do equipamento antes de analisar e corrigir sua reprodutibilidade. Existem vários métodos empíricos aceitos para estimar a incerteza da repetibilidade e da reprodutibilidade do sistema de medição. Os dois métodos mais comuns são o *Método de Média e Intervalo* (X-bar R) e o *Método de Análise de Variância (ANOVA)*. Em ambos os casos, a coleta de dados segue regras estritas para garantir resultados com credibilidade:

- **Número de operadores:** é necessário um mínimo de 3 operadores e estes devem utilizar o sistema de medição em contexto de produção.
- **Número de peças:** Devem ser selecionadas no mínimo 2 peças, representativas das variações encontradas no processo de fabricação. Se possível, o número preferencial seria 10; quanto maior o número de peças, melhor a estimativa do comportamento do processo.
- **Número de repetições:** Cada operador deve medir todas as peças mais de uma vez. Normalmente, são feitas 2 ou 3 repetições.
- **Ordem aleatória para as medições:** Para garantir que a ordem de medição não influencie os resultados, cada operador deve medir as peças em uma ordem aleatória.

Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

### Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

Estudos de repetibilidade

Estudos Gauge R&R

Recomendações para metrologistas

Conclusão

A solução PolyWorks MSA permite que os usuários criem e executem um estudo completo de Gauge R&R usando estes dois métodos padrão::

- 1 - O metrologista seleciona rapidamente o método de análise e especifica parâmetros, tais como, número de operadores, repetições e peças.
- 2 - Em seguida, o PolyWorks cria o projeto de inspeção com todas as peças necessárias em uma ordem de execução específica.
- 3 - Uma planilha de ordem de execução é então exportada automaticamente para uma planilha Excel, que orienta os operadores durante o processo de coleta de medição, garantindo uma ordem de medição aleatória.
- 4 - Uma barra de ferramentas orienta os operadores durante o processo de inspeção, garantindo que todas as características principais sejam medidas e que dados suficientes de apalpação e digitalização sejam adquiridos para obter extrações de medição confiáveis.
- 5 - Ao concluir a medição, o metrologista usa o projeto de inspeção para estimar a variabilidade do sistema de medição.

A principal diferença entre as metodologias X-bar R e ANOVA está na análise dos resultados. O método X-bar R possibilita quantificar repetibilidade e reprodutibilidade, usando cálculos do gráfico de controle. O guia "Análise do Sistema de Medição" do AIAG apresenta a metodologia em detalhes. O estudo Gauge R&R com a metodologia ANOVA fornece mais informações e, portanto, é mais abrangente.

A análise de variância (ANOVA) é uma análise estatística que divide as fontes de variações em um sistema de medição da seguinte forma:

- **Repetibilidade:** Variação do sistema de medição que não pode ser atribuída a outras fontes de variação.
- **Operador:** Variação entre operadores.
- **Interação entre peça e operador:** Variação resultante da interação entre operadores e peças (quando um operador mede peças diferentes de forma diferente).
- **Peça a peça:** Variação proveniente das peças dentro do estudo. Representa a variação do processo de fabricação.

Independentemente do método utilizado, as fontes de variação são consideradas estatisticamente independentes. Portanto, elas são montadas de forma aleatória (soma das variâncias) para expressar a incerteza total.

Em primeiro lugar, a metodologia determina se a variação resultante da interação entre peças e operadores é significativa. Se for, deve ser considerada na reprodutibilidade total do sistema ( $\sigma_{reprodutibilidade}$ ) da seguinte forma:

$$\sigma_{reprodutibilidade}^2 = \sigma_{operador}^2 + \sigma_{interação}^2$$

Com a repetibilidade ( $\sigma_{repetibilidade}$ ) identificada diretamente durante o estudo, é possível determinar a repetibilidade e reprodutibilidade ( $\sigma_{R\&R}$ ) do sistema de medição da seguinte forma:

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{reprodutibilidade}^2 + \sigma_{repetibilidade}^2$$

Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

Estudos de repetibilidade

Estudos Gauge R&R

Recomendações para metrologistas

Conclusão

Por fim, a variação total medida do processo ( $\sigma_{total}$ ) é obtida somando-se a repetibilidade e reprodutibilidade do sistema de medição à variação estimada do processo de fabricação ( $\sigma_{peça\ a\ peça}$ ) da seguinte forma:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{R\&R}^2 + \sigma_{peça\ a\ peça}^2$$

A análise dos resultados do estudo consiste em:

- Garantir que a incerteza do sistema de medição ( $\sigma_{R\&R}$ ) tenha uma pequena contribuição para a variação total do processo medido. A variação estimada do processo de fabricação (peça a peça) deve representar a maior parte da variabilidade. Quando a contribuição da variação peça a peça é relativamente maior do que o restante da incerteza, isso significa que o sistema de medição pode distinguir erros de fabricação de forma confiável.

- Comparar a variação do sistema de medição aos limites da especificação (tolerâncias) para garantir que a variação represente o máximo de 30% dos limites.

O passo de publicação da solução PolyWorks MSA converte os dados do estudo MSA em resultados interpretáveis, e dados acionáveis, por meio de tabelas, resumos, e gráficos de fácil leitura, como ilustrado na Figura 7. Essa é uma parte poderosa e importante do processo de estudo digital, pois ela facilita em muito a interpretação e a resolução de problemas dos resultados do estudo. Ele permite que os usuários publiquem resultados no modelo X-Bar R ou ANOVA Excel selecionado e analisem rapidamente o erro de medição e outras fontes de variabilidade. Ao realizar um estudo ANOVA, por exemplo, o metrologista pode dividir a variação em quatro categorias: peças, avaliadores, interação entre peças e avaliadores e erro de replicação devido ao medidor.

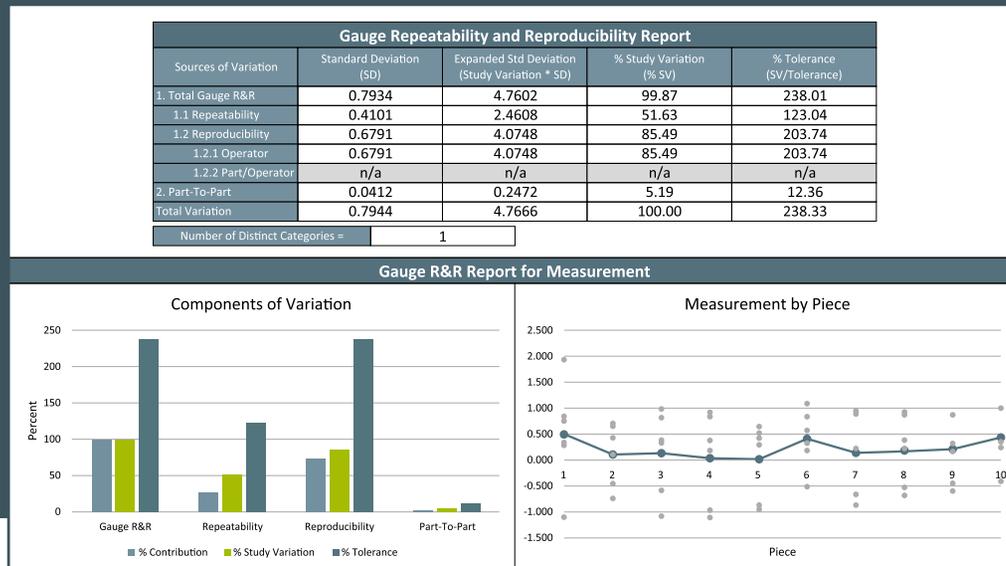


Figura 7  
Gauge R&R

Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

Estudos de repetibilidade

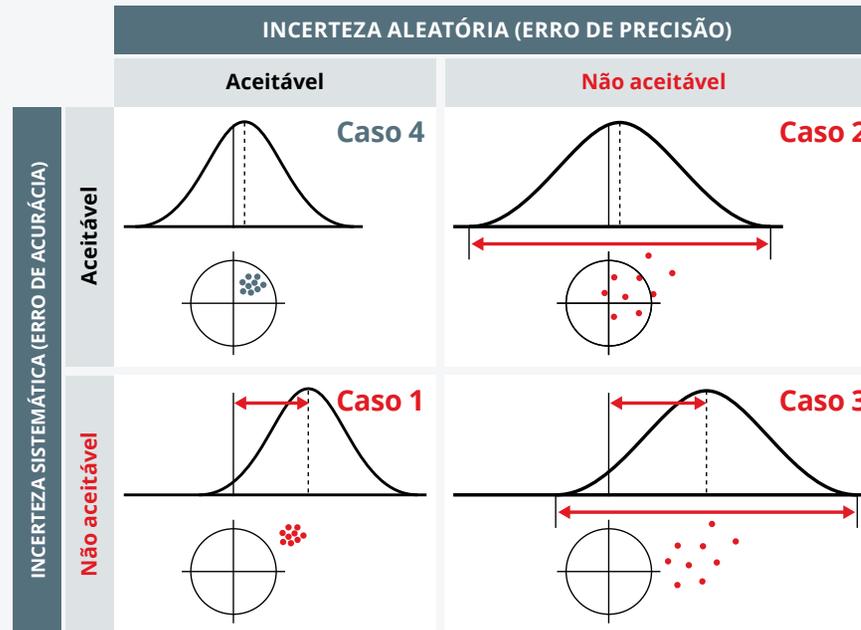
Estudos Gauge R&R

Recomendações para metrologistas

Conclusão

# Recomendações para metrologistas

Os dados coletados nos resultados de medição do sistema fornecem feedback sobre o efeito das incertezas de medição. Utilizando os índices de desempenho (página 5), o metrologista pode tomar ações corretivas para otimizar seu processo de medição. Vamos usar um exemplo concreto - um gráfico de destino e dispersão de valores de erro, conforme ilustrado na Figura 8.



**Figure 8** Erros de acurácia e precisão

O primeiro problema (caso 1) que um metrologista pode identificar é se há um erro de acurácia – pode vir do viés de linearidade do sistema, mas em ambos os casos, esse erro pode ser facilmente corrigido. As causas possíveis de erro de acurácia podem ser<sup>4</sup>:

- O dispositivo de metrologia precisa de calibração
- Um dispositivo, equipamento ou dispositivo de fixação desgastado
- Um erro na referência usada no processo de análise
- O método de medição (por exemplo, a técnica de fixação)

O segundo problema que um metrologista pode enfrentar é quando há um erro de precisão (caso 2). Isso pode estar relacionado ao próprio sistema de medição (repetibilidade) ou ser causado pelos operadores (reprodutibilidade).

Possíveis causas de erro de precisão podem ser<sup>4</sup>:

- Peça relacionada: forma, posição, acabamento superficial, conicidade, consistência da amostra
- Relacionado ao instrumento: reparo, desgaste, falha de equipamento ou dispositivo de fixação, má qualidade ou manutenção
- Metodologia relacionada: variação na configuração, técnica, retenção, fixação
- Relacionado ao operador: técnica, posição, falta de experiência, habilidade de manipulação ou treinamento, sensação de cansaço

Se todas as fontes de erro estiverem presentes (caso 3), o metrologista deve analisar o desempenho do sistema de medição usando os índices, e corrigir um tipo de erro por vez para que o sistema de medição seja aceitável (caso 4).

<sup>4</sup> Análise do Sistema de Medição (MSA) publicada pelo Automotive Industry Action Group (AIAG)

Coleta de medições 3D confiáveis | A abordagem de metrologia 3D inteligente

Entendimento dos fundamentos de MSA

Definição do sistema de medição

Índices de desempenho do sistema de medição

- Incerteza sistemática
- Incerteza aleatória

Capacidade e desempenho do sistema de medição

Incerteza expandida

Escolha da metodologia apropriada para avaliar a incerteza de sistemas de medição 3D complexos

Realização de estudos MSA usando a metodologia experimental e software de metrologia 3D inteligente

Estudos de repetibilidade

Estudos Gauge R&R

Recomendações para metrologistas

Conclusão

