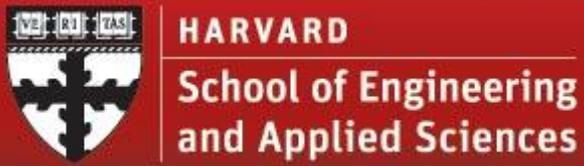


Planejamento de Experimentos

DOE-Design of Experiments

TAGUCHI Method

Prof. Dr. Messias Borges Silva



MESSIAS BORGES SILVA

Faculty member at

UNIVERSITY OF SÃO PAULO-USP

School of Engineering of Lorena- EEL-USP

SÃO PAULO STATE UNIVERSITY-UNESP

School of Engineering of Guaratinguetá

Visiting Scientist at

HARVARD UNIVERSITY

School of Engineering And Applied Sciences



Massachusetts Institute of Technology-MIT facilitator in Lean Enterprise – International courses



- **Engenheiro Industrial Químico (EEL-USP)**
- **Certified Quality Engineer (American Society for Quality-ASQ-USA)**
- **Pós-graduado em Ciências Térmicas (ITA)**
- **Pós-graduado em Qualidade (USJT)**
- **Mestre em Engenharia Mecânica (UNESP)**
- **Doutor em Engenharia Química (UNICAMP)**
- **Pós doutorado Harvard University**
- **Livre Docente em Engenharia da Qualidade (UNESP)**
- **Espec. em Design of Experiments, Lean Enterprise, Lean Product Development, Innovation&Design Thinking, Innovation Beyond Buzzwords (Massachusetts Institute of Technology-MIT-USA); Lean Production (Porsche Consulting)**
- **Professor convidado da Harvard University, Massachusetts Institute of Technology-MIT, University of Massachusetts, Colorado State University – USA, University of Tennessee e University of Minnesota-USA**
- **Lider da Iniciativa CDIO do MIT na América Latina**
- **Professor e Ex-Diretor Geral da EEL(USP-Lorena), UNESP**
- **Coordenador do Curso de Pós-graduação em Engenharia da Qualidade da EEL-USP Lorena**
- **Consultor de empresas**

...We have a large reservoir of engineers (and scientists) with a vast background of engineering know-how. They need to learn statistical methods that can tap into the knowledge.

Statistics used as a catalyst to engineering creation will, I believe, always result in the fastest and most economical progress...

George Box, 1992

Cone of Learning

HOW MUCH
WE TEND TO
REMEMBER

OUR LEVEL OF
INVOLVEMENT

**DO THE
REAL
THING!**

Faça anotações!
Aplicando os
conhecimentos na
sua área é a **única**
forma de
sedimentá-los!

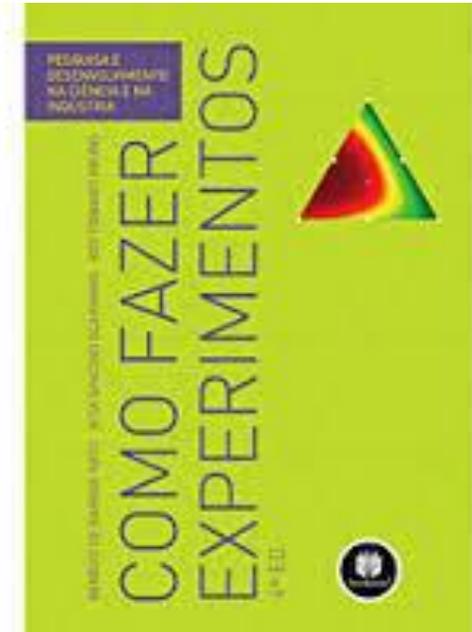
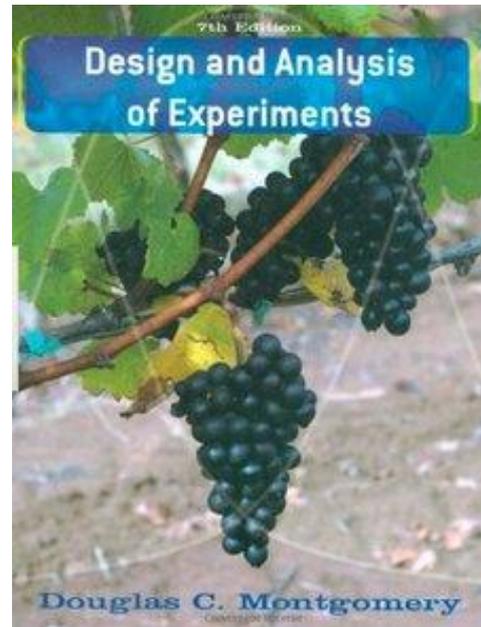
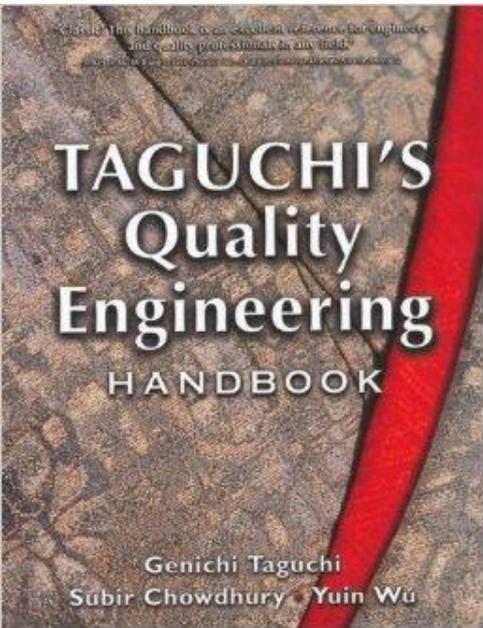


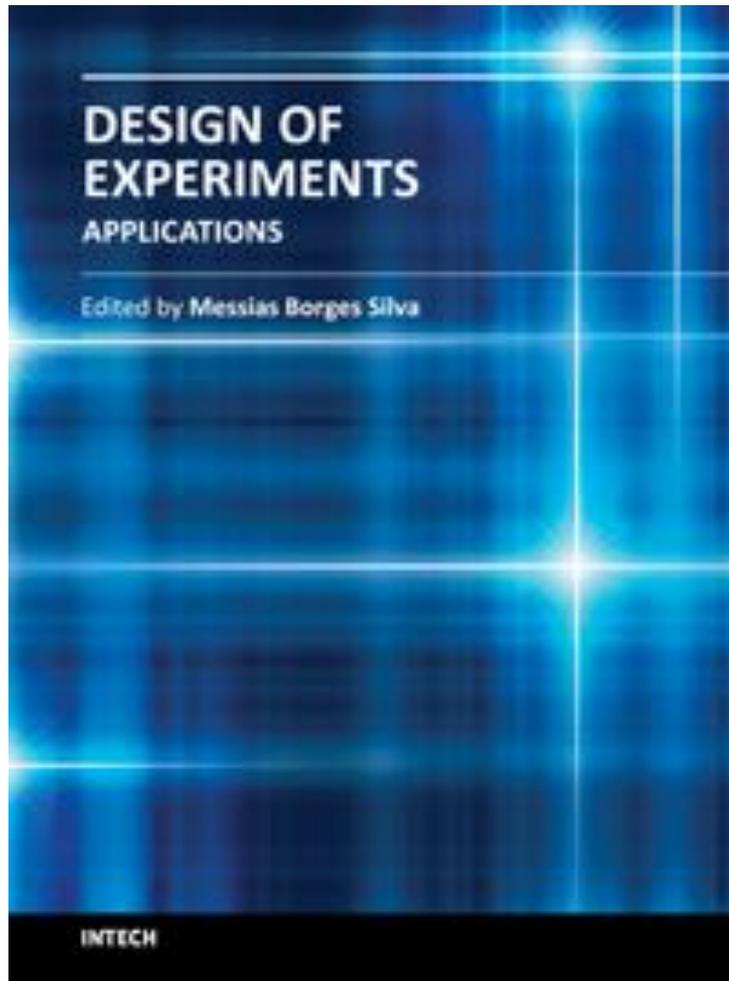
Passive

Active

Bibliografia de DOE

Projeto de Experimentos





<https://www.intechopen.com/books/design-of-experiments-applications>

DESIGN OF EXPERIMENTS

DOE

Engineering Experiments

- Reduce **time** to design/develop new products & processes
- Improve **performance** of existing processes
- Improve **reliability** and performance of products
- Achieve product & process **robustness**
- **Evaluation** of materials, design alternatives, **setting** component & system tolerances, etc.

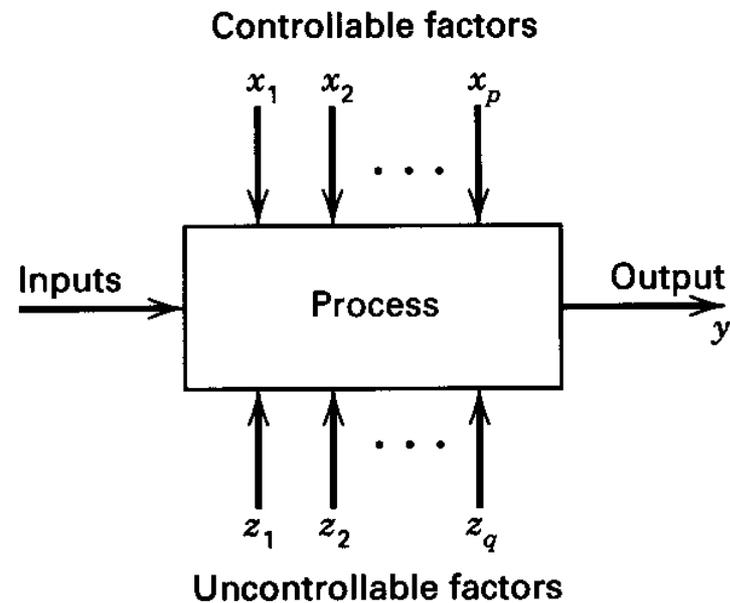


Figure 1-1 General model of a process or system.

Medidas de Posição e Dispersão

Média aritmética (média):

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x}{n}$$

Amplitude (R):

$$R = \text{maior valor} - \text{menor valor}$$

Variância (s^2):

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x - \bar{x})^2$$

Desvio padrão (s):

$$s = \sqrt{s^2}$$

PROJETO DE EXPERIMENTOS

DESIGN OF EXPERIMENTS-DOE

Ferramenta que vem sendo utilizada para verificar o funcionamento de sistemas ou processos produtivos, permitindo melhoria destes, redução na variabilidade, e conformidade próxima do resultado desejado, além de redução no tempo de processo e, conseqüentemente, nos custos operacionais.

Benefícios do DOE

- Larga aplicação em todas as áreas
- Mostra as variáveis mais importantes do processo
- Permite a otimização
- Requer menor número de experimentos que os métodos convencionais
- Maior controle dos processos
- Redução significativa dos custos
- Redução no tempo de desenvolvimento de um produto
- Redução na variabilidade dos produtos e maior aproximação com os requisitos exigidos pelos clientes

Etapas do DOE

- Planejamento
- Execução dos experimentos
- Análise dos dados
- Experimento de confirmação
- Conclusão

Definições

- **Fatores** : são as variáveis (independentes) do processo que podem ser controladas. Ex: temperatura, pressão, agitação, etc
- **Resposta** : são as variáveis de saída do processo (dependentes). Ex: rendimento, resistência, vida útil, etc
- **Nível** : os níveis de um fator são os valores do fator examinado. Ex : temperatura (273K e 373K)
- **Replicação** : é a repetição de um experimento ou observação

Matriz de Experimento

Exp.	A	B	C	Resposta
1	-	-	-	
2	+	-	-	
3	-	+	-	
4	+	+	-	
5	-	-	+	
6	+	-	+	
7	-	+	+	
8	+	+	+	

Interpretação

- Cálculo dos Efeitos dos Fatores
- Análise de Variância
- Gráficos Tridimensionais (Superfície de Resposta) e de Contorno

Gráfico Tridimensional

3D Surface Plot (TAGUCHI.STA 32)
 $z = 4.489e3 - 1.629e3 * x - 4.492e3 * y + 851.4$

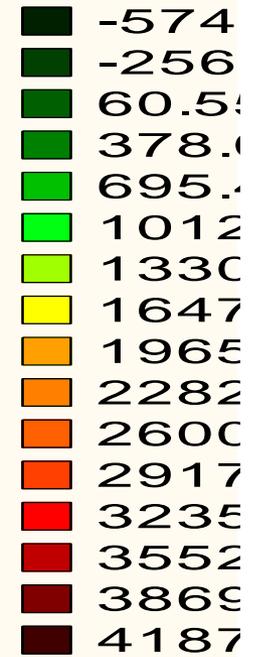
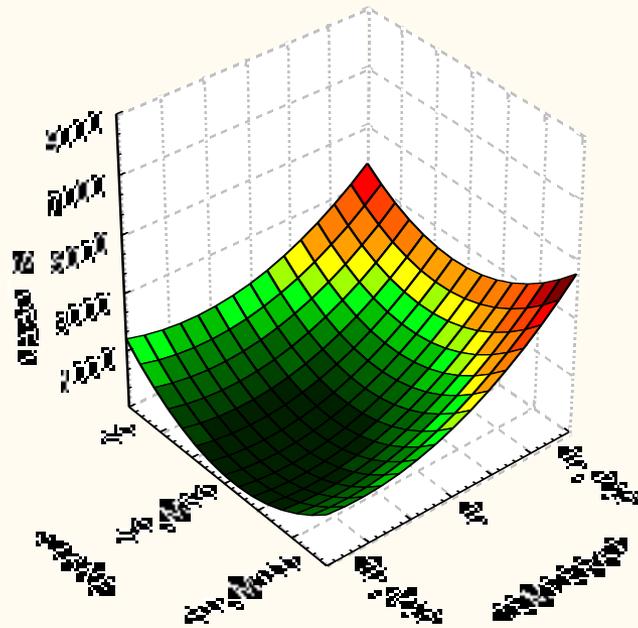


Gráfico Tridimensional

3D Surface Plot (TAGUCHI.STA 32)
 $z = 2.335e3 - 3.199e3 * x + 3.937e3 * y + 904.10$

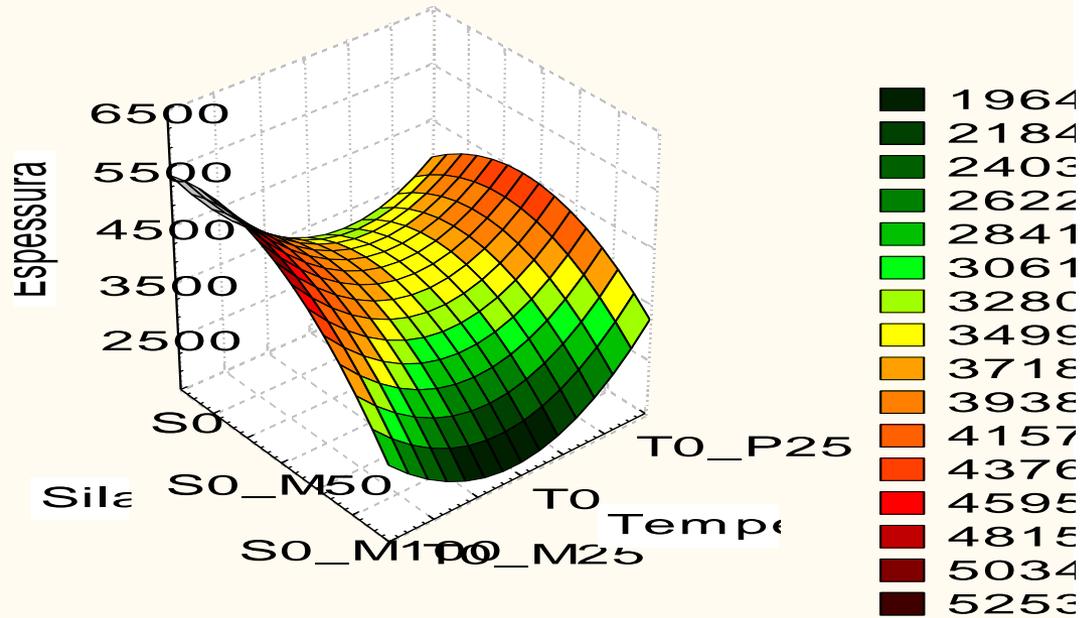
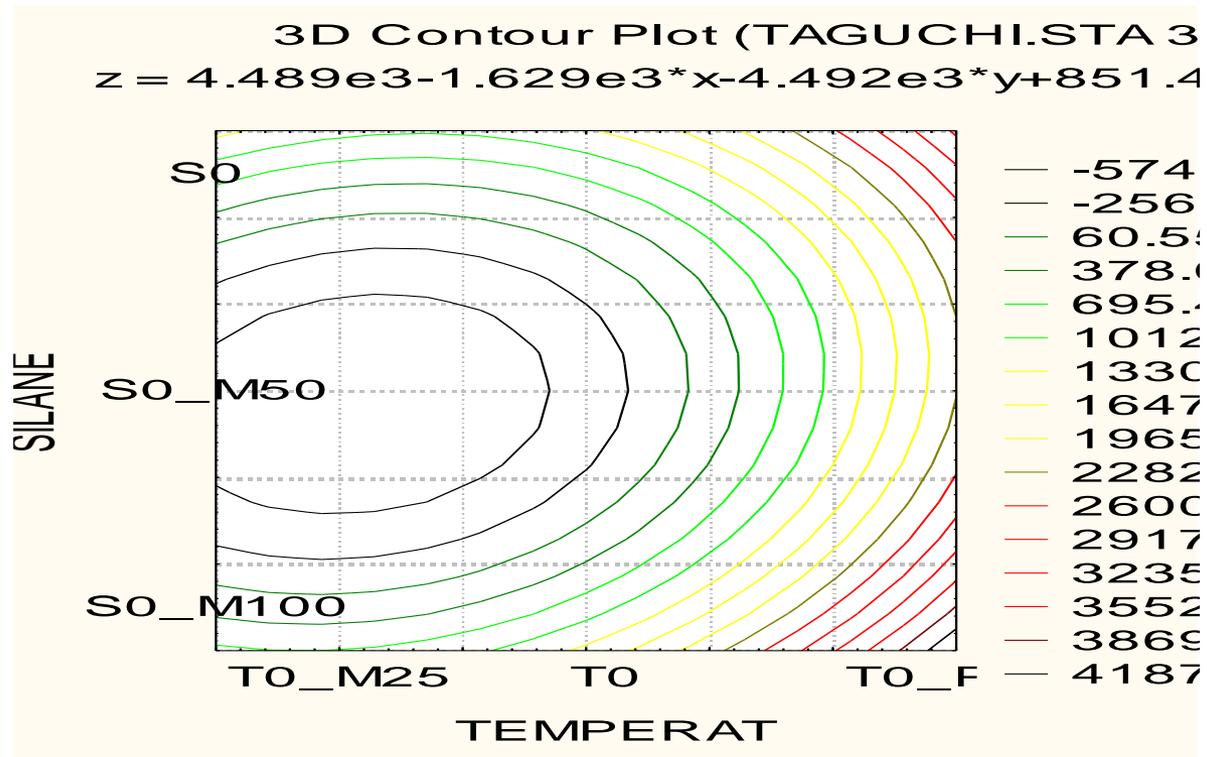


Gráfico de Contorno



Análise de Variância

Analysis of Variance (taguchi.sta)

Mean = 3621.94 Sigma = 1207.08

	SS	df	MS	F	p
SED_1	592961.	1	592961.	7.66058	.109510
{2}TEMPERAT	4042231.	2	2021115.	26.11120	.036885
{3}PRESSURE	7744105	2	3872053.	50.02383	.019599
{4}NITROGEN	3632181.	2	1816090.	23.46244	.040879
{5}SILANE	6610248	2	3305124	42.69956	.022884
{6}SETT_TIM	401897.	2	200949.	2.59610	.278079
{7}UNUSED_2	68022.	2	34011.	.43940	.694736
{8}CLEANING	1523430.	2	761715.	9.84075	.092245
Residual	154808.	2	77404.		

EXPERIMENTO DA PIPOCA

Objetivo : Praticar um experimento fatorial completo 2^3

Fatores :	(+)	(-)
A- Fogo	alto	baixo
B- Fluido	óleo	manteiga
C- Agitação	com	sem

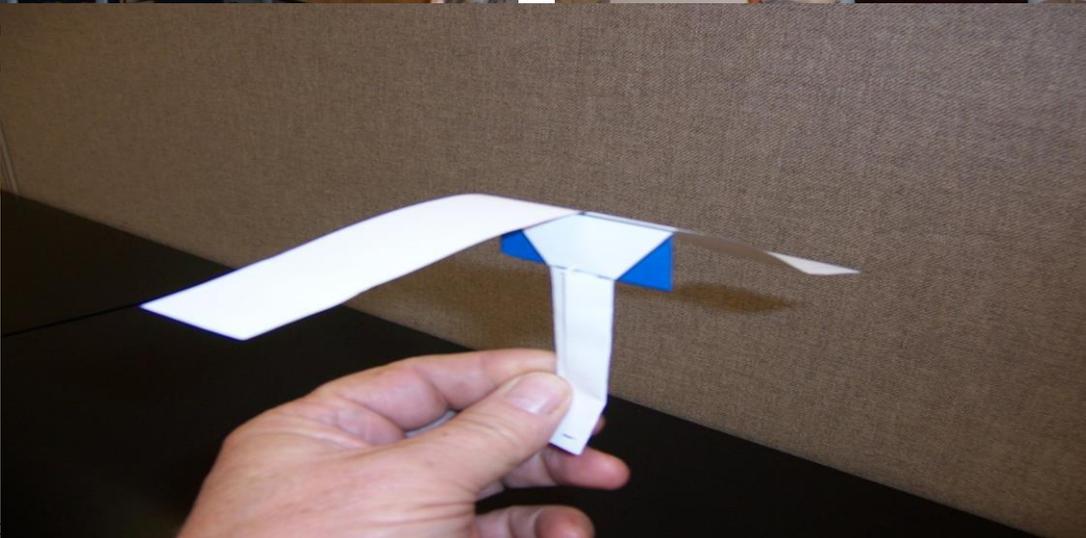
Variável Resposta: Volume de pipoca produzido (com um copinho de café com milho)

				Volume (cm ³)	Volume (cm ³)	Média	S _i ²
	A	B	C				
1	-	-	-				
2	+	-	-				
3	-	+	-				
4	+	+	-				
5	-	-	+				
6	+	-	+				
7	-	+	+				
8	+	+	+				

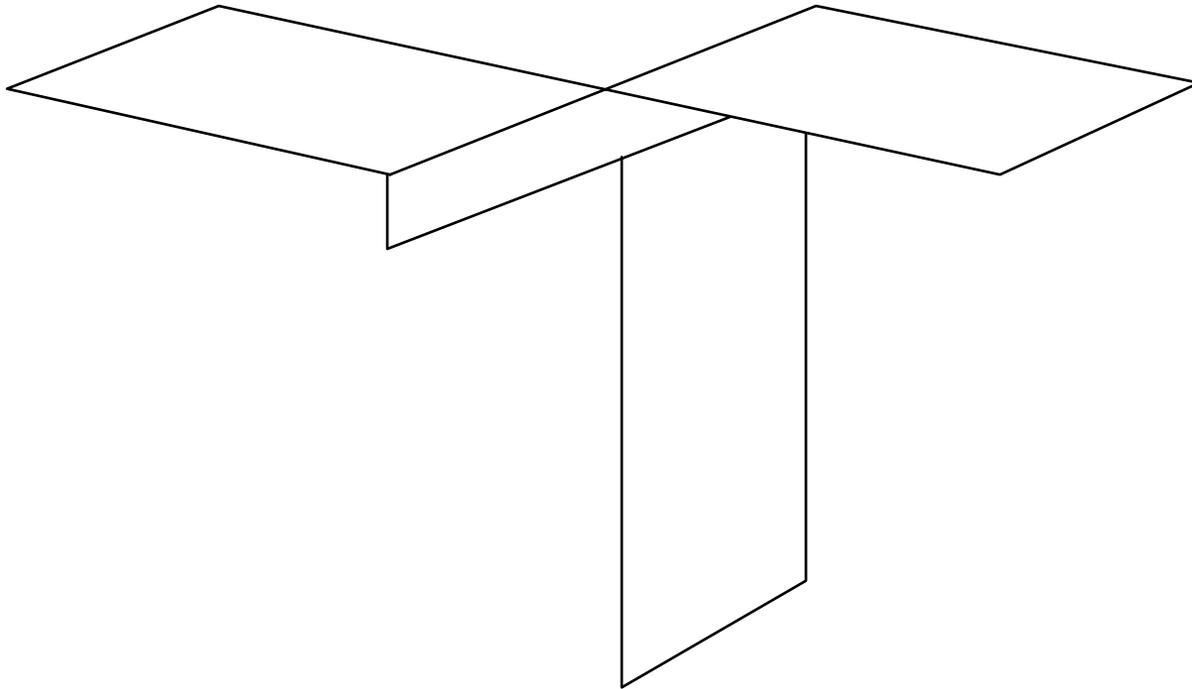
Variações no Processo

MICHIGAN MANUFACTURING TECHNOLOGY CENTER

Helicópteros



Variações no Processo

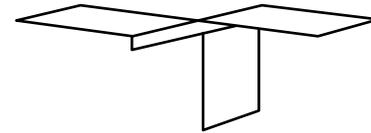


Vamos tentar entender as variações

Helicopter Experiment

Full factorial design : 3 factors , 2 levels

Factor	Level low (-)	Level high (+)
A-Wing Length	80mm	130mm
B- Body length	80mm	130mm
C-Body width	20mm	40mm



Experimentos	Fatores			Tempo de vôo (segundos)			Tempo Médio	S _i ²
	A	B	C					
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

EXPERIMENTO DA PIPOCA

Objetivo : Praticar um experimento fatorial completo 2^3

Fatores :	(+)	(-)
A- Fogo	alto	baixo
B- Fluido	óleo	manteiga
C- Agitação	com	sem

Variável Resposta: Volume de pipoca produzido (com um copinho de café com milho)

				Volume (cm ³)	Volume (cm ³)	Média	S ₁ ²
	A	B	C				
1	-	-	-				
2	+	-	-				
3	-	+	-				
4	+	+	-				
5	-	-	+				
6	+	-	+				
7	-	+	+				
8	+	+	+				

Variações no Processo

Cálculos Helicóptero

Variações no Processo

Cálculos Helicóptero

Level of significance for one-tailed test

.10 .05 .025 .01 .005 .0005

Level of significance for two-tailed test

<i>df</i>	.20	.10	.05	.02	.01	.001
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
120	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
∞	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291