TÉCNICO LISBOA

Laboratório de Física Experimental Avançada I

Introdução

Pedro Assis 2022

LFEA I

- Curso experimental de MEFT
- Medidas experimentais de precisão
- Fenómenos com natureza aleatória
- Foco na medida, na análise dos dados e depois na sua interpretação

Bibliografia

- Principal
  - **Textos de apoio de LFRA/LFEAII: Aulas teóricas, Guias de Laboratórios:** S. Ramos 2014 IST
- Secundária
  - **Introductory Nuclear Physics:** K.S. Krane # John Wiley & Sons
  - **Measurement and Detection of Radiation:** N. Tsoulfanidis 1995 Taylor & Francis
  - **Statistical Data Analysis:** G. Cowan # Oxford Science Publications

  - **Atoms, Radiation, and Radiation Protection:** James E. Turner, John Wiley & Sons, inc. 1995
  - **Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach:** Leo, William R. ;Springer 1987
  - **Radiation Detection and Measurement:** C. F. Knoll; John Wiley 2000

A estrutura laboratorial

- Sessões nominais de 3.5h
  - Introdução
  - Introdução aos detetores
    - Cintiladores;
    - Si;
    - Geiger-Müller

A estrutura laboratorial

- Sessões nominais de 3.5h
  - Trabalhos
    - Alfa
    - Beta
    - Gama
    - Geiger-Müller
- Equipamentos complexos que necessitam de alguma habituação
- Alguns aspectos dos equipamentos são perigosos

  (para as pessoas mas sobretudo para os equipamentos: cuidado!)
- Incidência na medição com a máxima precisão possível no resultado final
- Conhecimento do detector e da física associada ao detector
- Posterior interpretação: conhecimento dos modelos teóricos

Think ahead!
Perguntem!
Calm!
Respect signs!

Preparação do laboratório

- Estudo do objectivo
- Estudo da física presente nos detectores

  “o que esperam ver?”
- Preparação da análise de dados
- Estudo dos “modelos teóricos” (e.g. ângulo sólido) para interpretação de resultados durante a aula
- Guião do laboratório com os objetivos principais.
- Textos de apoio relacionados com a experiência (ou outras similares). Não existe um cookbook!!

Durante o laboratório (avaliado)

- Conseguir explicar o enquadramento da experiência, os procedimentos, os detectores, a electrónica, o que se observa, os fenómenos presentes (dos detectores e dos fenómenos em estudo)
- Os docentes perguntam!!
- É responsabilidade do grupo cumprir (e verificar) todos os objectivos da sessão.
- Durante a sessão devem ser feitas análises rápidas (sem ajustes, sem estimativa precisa das incertezas) para perceber os resultados e detectar algum problema.
- O material tem sempre razão e pode "portar-se mal". É responsabilidade do grupo identificar! →sentido crítico !

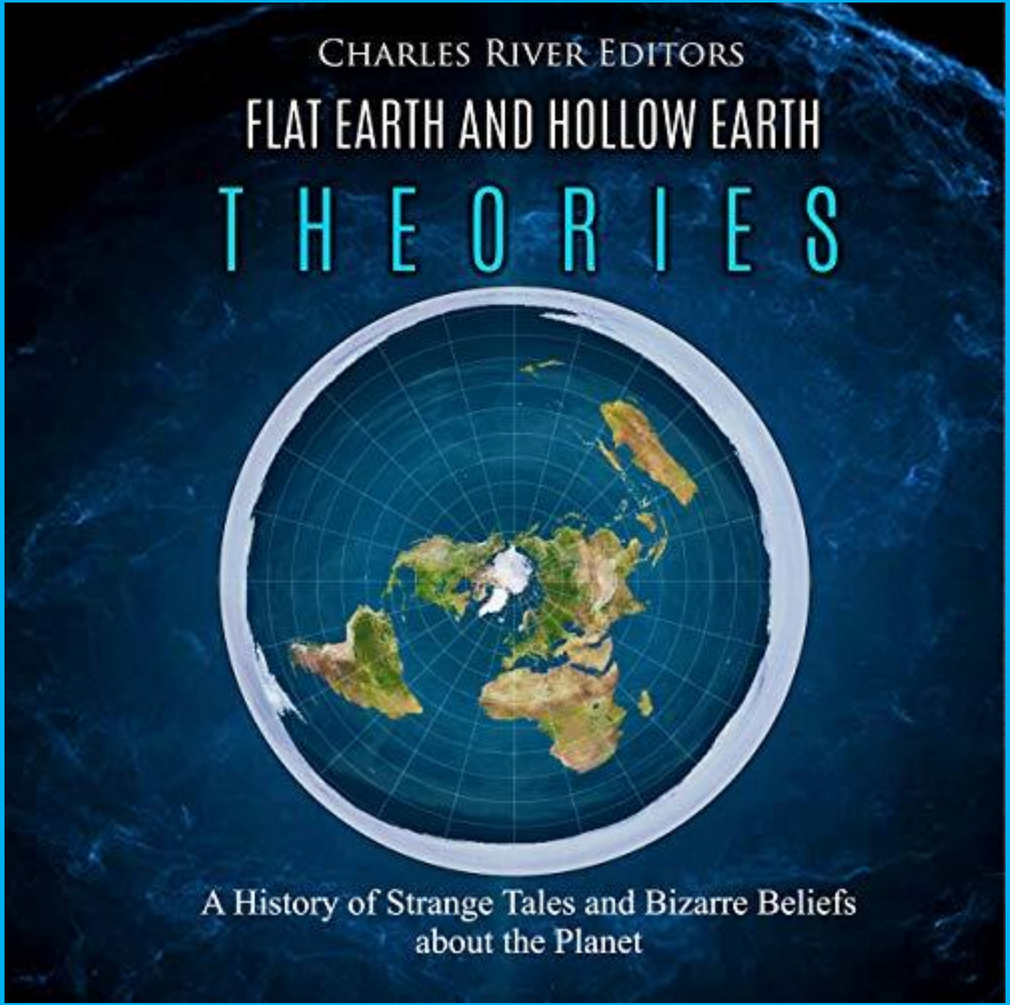
Avaliação

- Avaliação no laboratório
  - Postura no laboratório
  - Desenvoltura experimental
  - Anotação e registo dos dados
  - Participação na discussão
  - Tratamento de dados preliminar no laboratório
- Avaliação posterior
  - Tratamento e análise de dados
  - Conclusões
  - Reporte em logbook de análise
  - Não existe um relatório formal

TÉCNICO LISBOA

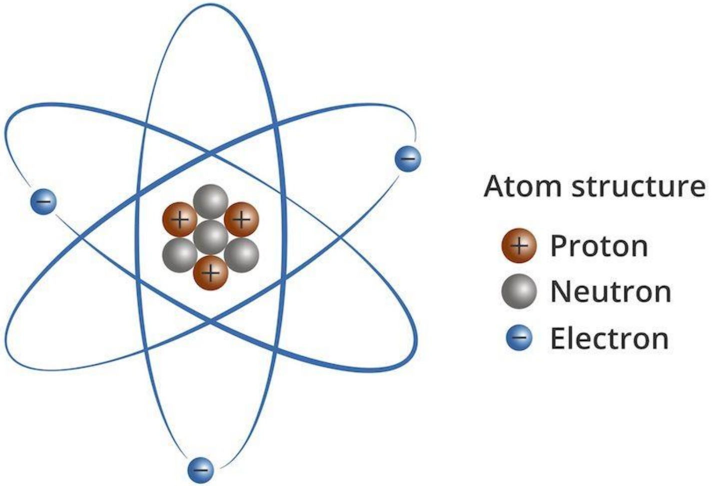
5 minutos de teoria

Um ponto de entrada no tema



Átomos, Núcleos e afins

- Existem átomos
  - Átomos são compostos por
    - electrões,
    - núcleos e
    - espaço vazio
  - Os Núcleos são compostos por Protões e Neutrões
  - Os Protões e os Neutrões são compostos por …



Powers of 10 (07:34)
https://youtu.be/0fKBhvDjuy0?t=454

- Existem núcleos instáveis
  - Núcleos que não estão no nível mínimo de energia
  - Vão transitar para o nível fundamental → emissão de energia
  - A energia é emitida na forma de radiação α, β, γ
  - Muitas vezes a energia disponível resulta de transições de níveis:
    - (muitas vezes) Radiação tem energia bem definida

Radiação

- Alfa (α): núcleo de Hélio. Muito estável
  - 2 protões + 2 neutrões
  - Carga 2
  - pesado
- Beta (β^- ou β^+): um electrão ou um positrão
  - Carga 1
  - leve
- Gama (γ)
  - Sem carga

Radiação X

- E os raios X??   Atómico

- fotão de alta energia proveniente núcleo (~MeV): Gama
- Fotão de menor energia (keV), proveniente da transição de um electrão para camadas interiores: Raio X

Muitas vezes há vários tipos de radiação emitido pelo mesmo núcleo!

Radiação e a matéria

- A radiação interage com a matéria (!)
  - Deposita energia no meio através de colisões, ionizações, excitações, …
- Detectores constituídos de matéria (muita ou pouca, depende)
- “recolhem” os portadores de sinal e transformam (por vezes amplificando fenómenos) num sinal eléctrico
- A electrónica amplifica e digitaliza
- Aparece um valor no ecrã e pode-se registar…
- Se e só se tudo no processo for injectivo (linear costuma ser desejável) então pode ser calibrado e a partir do valor no ecrã podemos estimar a energia da partícula

Valor lido ⟷ Sinal digital ⟷ Sinal do detector ⟷ Quantidade de energia depositada ⟷ Energia da radiação

A certeza das coisas

A certeza das coisas

- Se uma experiência for “bem feita” dá o resultado certo
  $\Leftrightarrow$ dá o resultado previsto

- Resultados mais comuns
  - Quase deu certo
  - O valor é bom porque está muito perto
  - Desviou-se só um pouco
  - Não deu o resultado devido a erros experimentais

- Nota: <u>a experiência está sempre certa</u>: A natureza não segue as leis “só às vezes”! As condições podem não ser as pretendidas!
  - E.g. corda vibrante gasta, bird’s poop = CMB, Proton decay = Supernova neutrinos,…

Qual é o raio?

R=25+-0,5 mm

Qual é o peso de uma oreo?

3,25+-0,125 ??

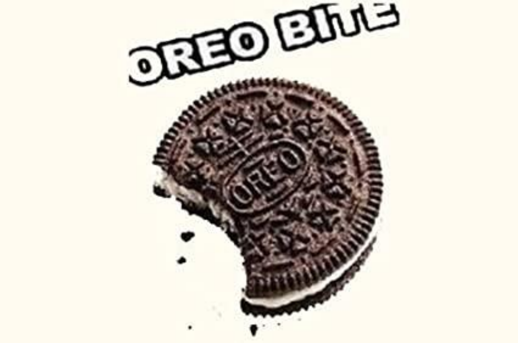
Em ambos os casos os instrumentos têm uma escala com maior "passo" demasiadamente grande

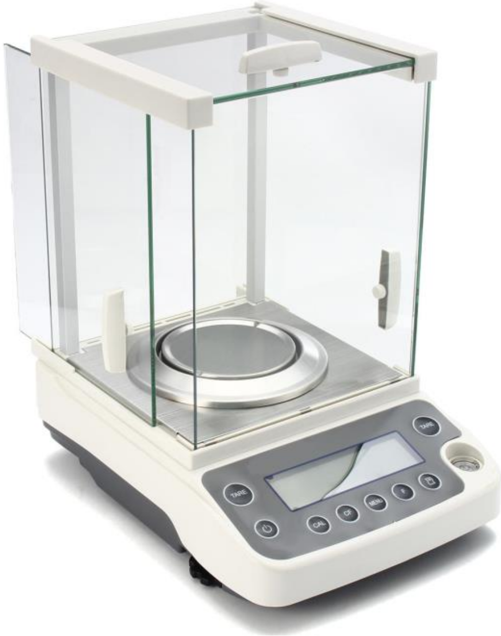
E se…
Pedisse 3,5 de farinha?

Pequeno truque...

Melhora?

Qual a peso de uma bolacha com uma dentada?





Mesmo com o melhor instrumento do mundo, depende da dentada: **flutuações intrinsecas**

$$x \pm y$$

X?

±?

y?

X tem sempre um valor esperado?

X = número de pintas que fica no lado de cima de um dado

→Vamos lançar dados

Uma medida

- Atirei o dado → um ensaio, uma medida

- Atirar o dado
- Medir o número de pintas
- Qual o valor?
    -
- Qual a incerteza?
    -

Então sei sem sombra de dúvidas quantas pintas saem sempre que atirar um dado ??

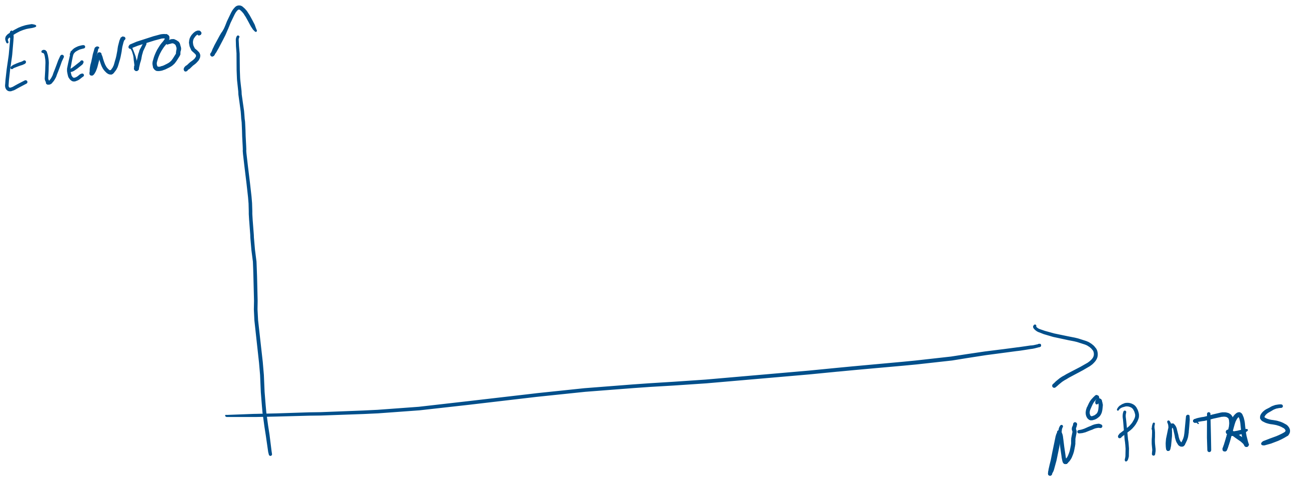
Sei sem sombra de dúvida quantas pintas saíram neste ensaio?

Qual a resolução do "instrumento de medida"?

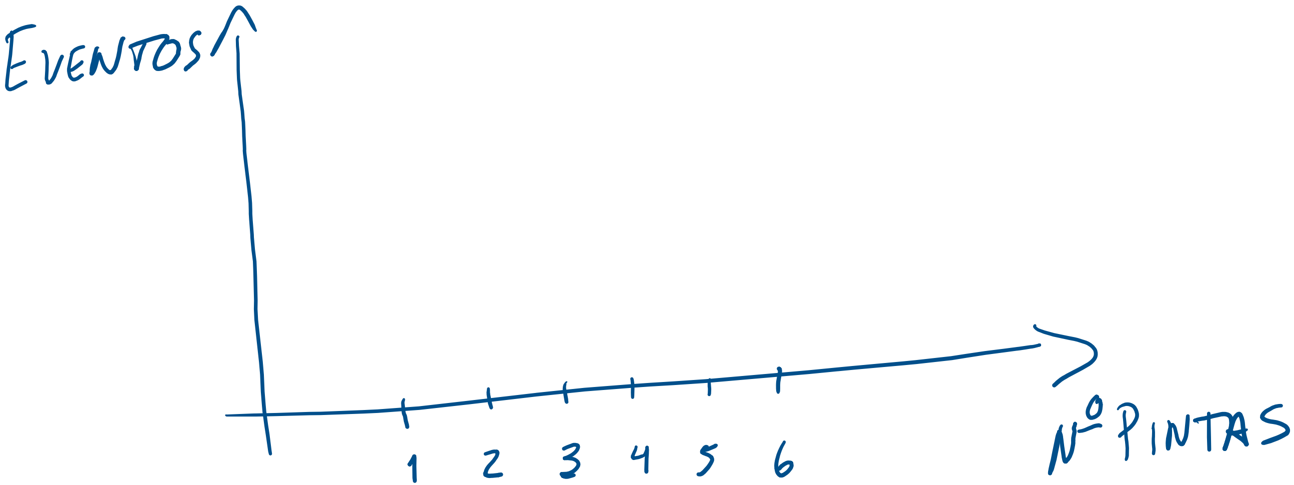
Consigo dizer alguma coisa sobre "Se atirar um dado vai sair…"

https://freeonlinedice.com/
https://www.random.org/dice/
https://www.random.org/

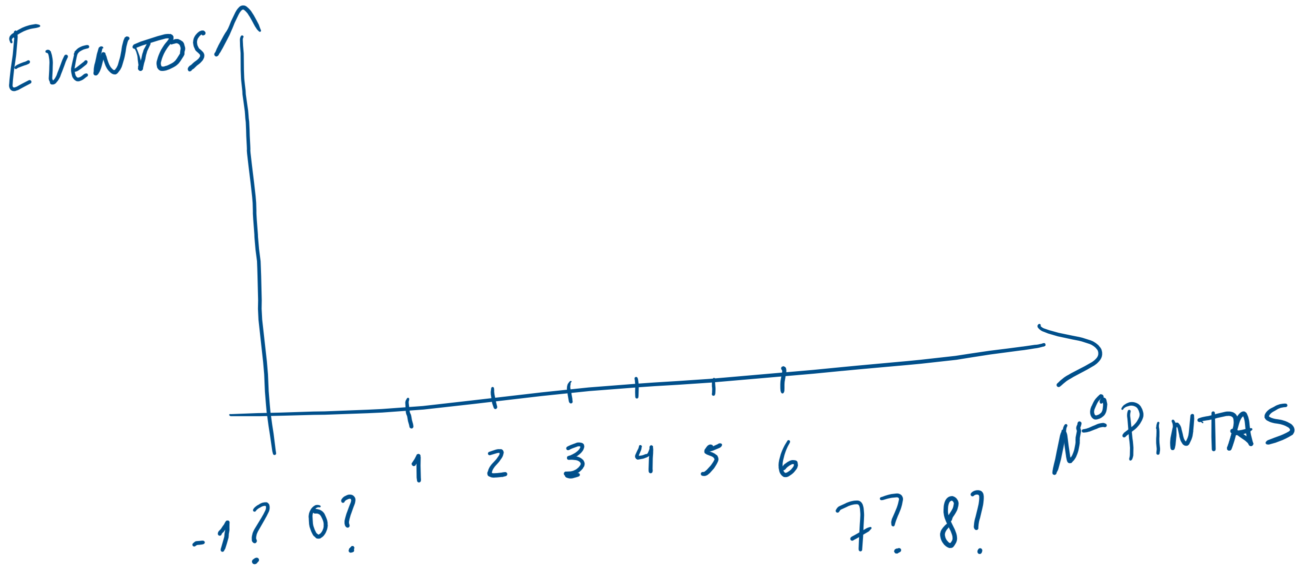
Distribuições de probabilidade



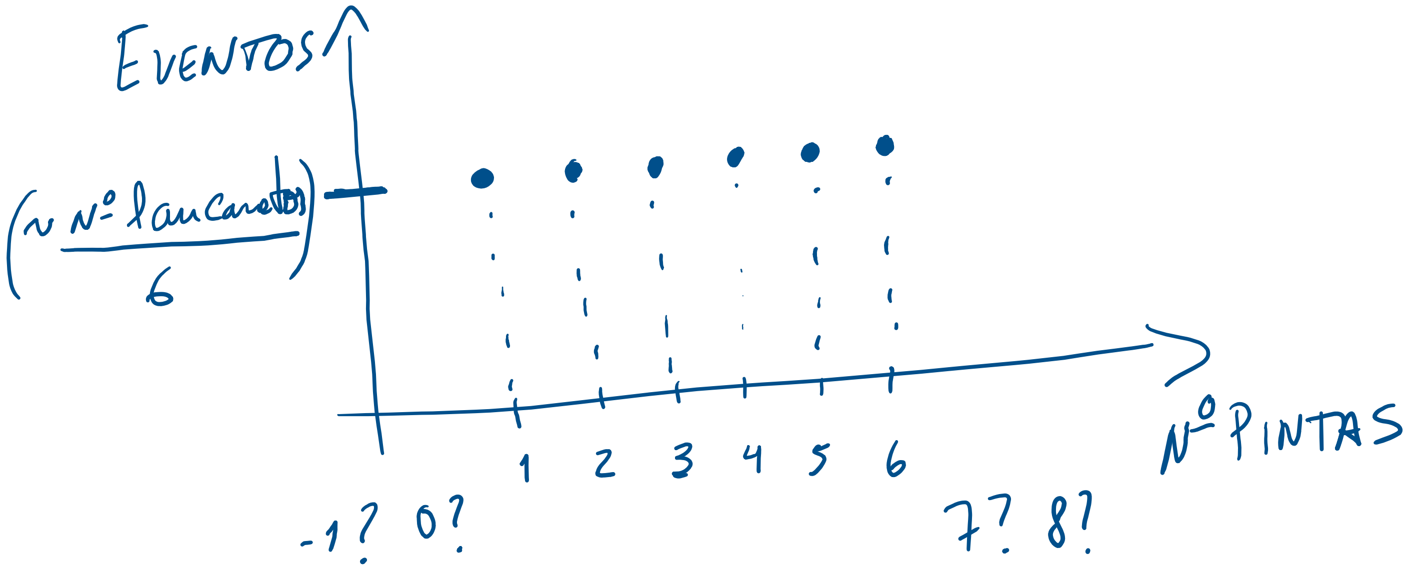
Distribuições de probabilidade



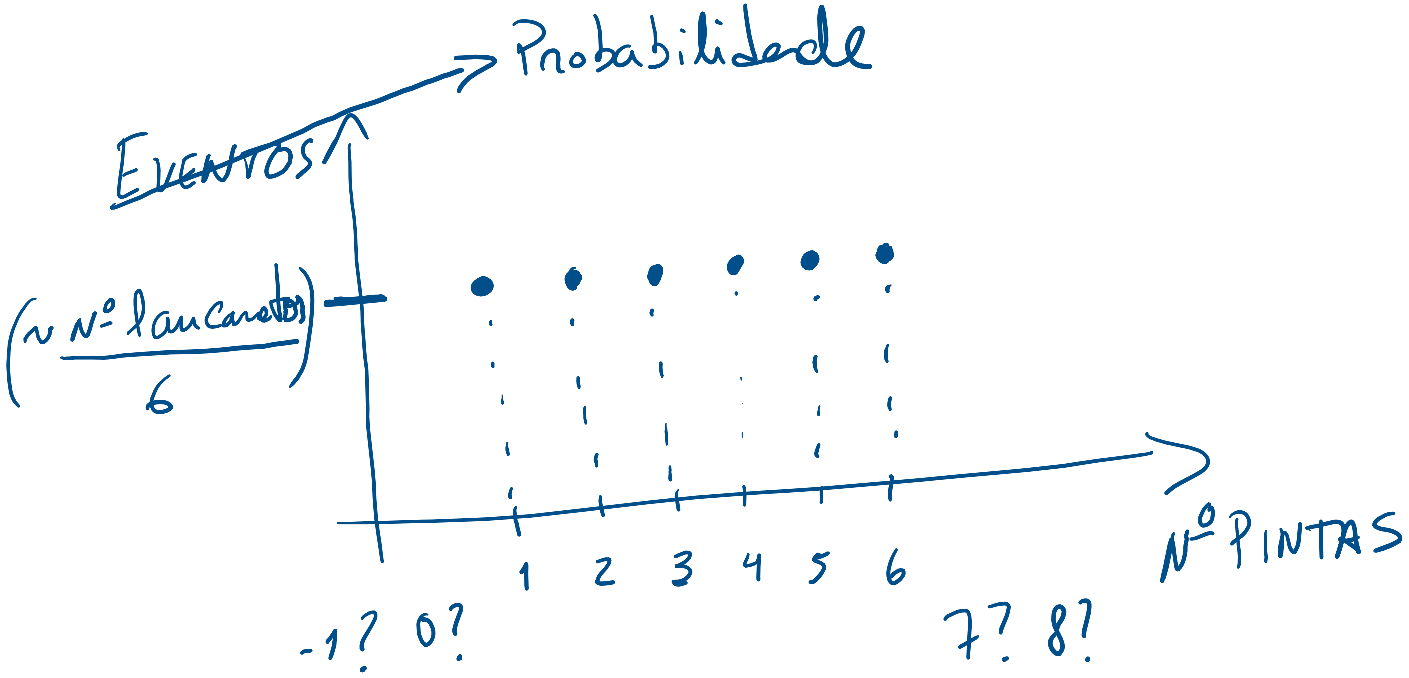
Distribuições de probabilidade



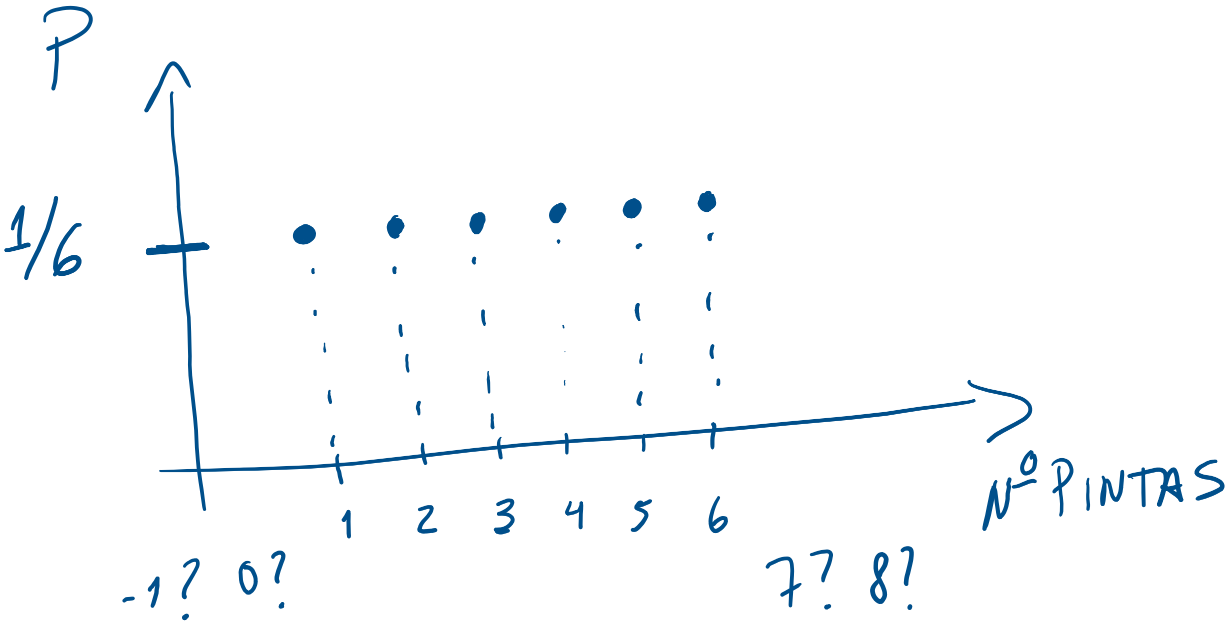
Distribuições de probabilidade



Distribuições de probabilidade



Distribuições de probabilidade



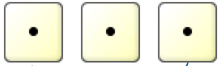
Distribuição Uniforme: igual probabilidade

Compliquemos

Atiram-se 3 dados. Qual a probabilidade de sair 0, 1, 2, 3 dados com apenas 1 pinta (Ás)

3 Probabilidade de termos 3 dados c/ ás

→Só existe uma combinação

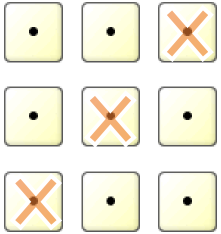


1/6 1/6 1/6

$$P(3) = \frac{1}{6} \times \frac{1}{6} \times \frac{1}{6} = \frac{1}{216} \approx 0{,}5\%$$

2 Probabilidade de termos 2 dados c/ ás

→3 combinações



$$\frac{1}{6} \times \frac{1}{6} \times \frac{5}{6}$$

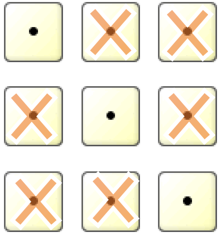
$$\frac{1}{6} \times \frac{5}{6} \times \frac{1}{6}$$

$$\frac{5}{6} \times \frac{1}{6} \times \frac{1}{6}$$

$$3\times\left(\left(\frac{1}{6}\right)^2 \times \frac{5}{6}\right) \approx 6{,}9\%$$

1 Probabilidade de termos 1 dado c/ ás

→3 combinações



$$3 \times \frac{1}{6} \times \frac{5}{6} \times \frac{5}{6} \approx 34{,}7\%$$

0 Probabilidade de termos 0 dados c/ ás

→Só existe uma combinação

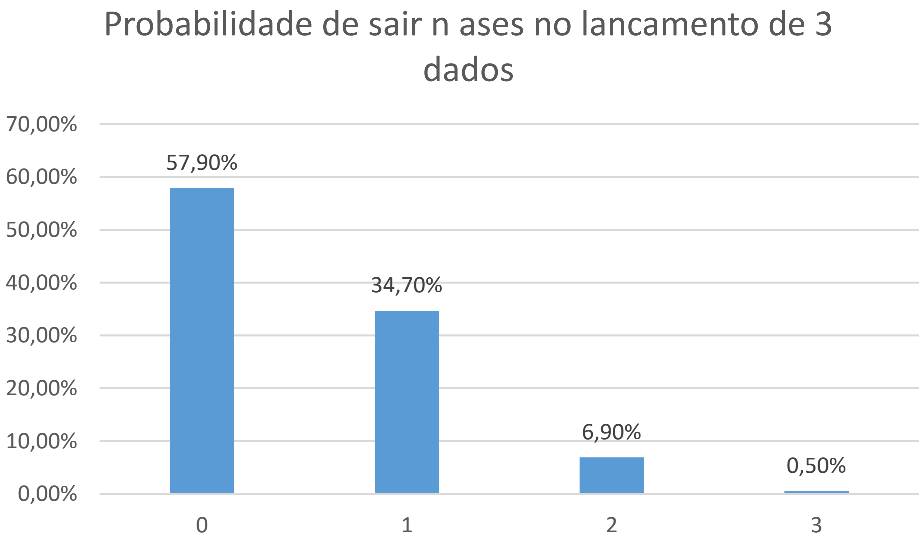
$$\frac{5}{6} \times \frac{5}{6} \times \frac{5}{6} = 57{,}9\%$$

100%

Simplificando

- Mostrando isto num gráfico

P



n

$0 \leq P \leq 1$

A distribuição binomial

- Casos de sucesso / insucesso

p Probabilidade de sucesso

$q = 1 - p$ Probabilidade de insucesso

Probabilidade de acontecerem **r** sucessos e **N-r** insucessos em **N** ensaios (**numa determinada sequência**):

$$\underbrace{p \times p \times \ldots \times p}_{r \text{ sucessos}} \times \underbrace{q \times q \times \ldots \times q}_{N-r \text{ insucessos}} = p^r (1-p)^{N-r}$$

Um sucesso é um sucesso em qualquer dos ensaios: várias combinações são equivalentes. Combinações possíveis:

$$^N C_r = \frac{N!}{r!(N-r)!}$$

Distribuição binomial

$$P(r) = {}^{N}C_{r} \cdot p^{r}(1-p)^{N-r}$$

Distribuição binomial

$$P(r) = {}^{N}C_r \cdot p^r (1-p)^{N-r}$$

Norma: pela construção a soma de todas as probabilidades (todas as hipótese) deve ser 1

$$\sum_{r=0}^{N} P(r) = \sum_{r=0}^{N} {}^{N}C_r \underbrace{p^r}_{y} \underbrace{(1-p)^{N-r}}_{x}$$

$$= [\cancel{p} + (1-\cancel{p})]^N$$

$$= 1$$

Expansão Binomial:

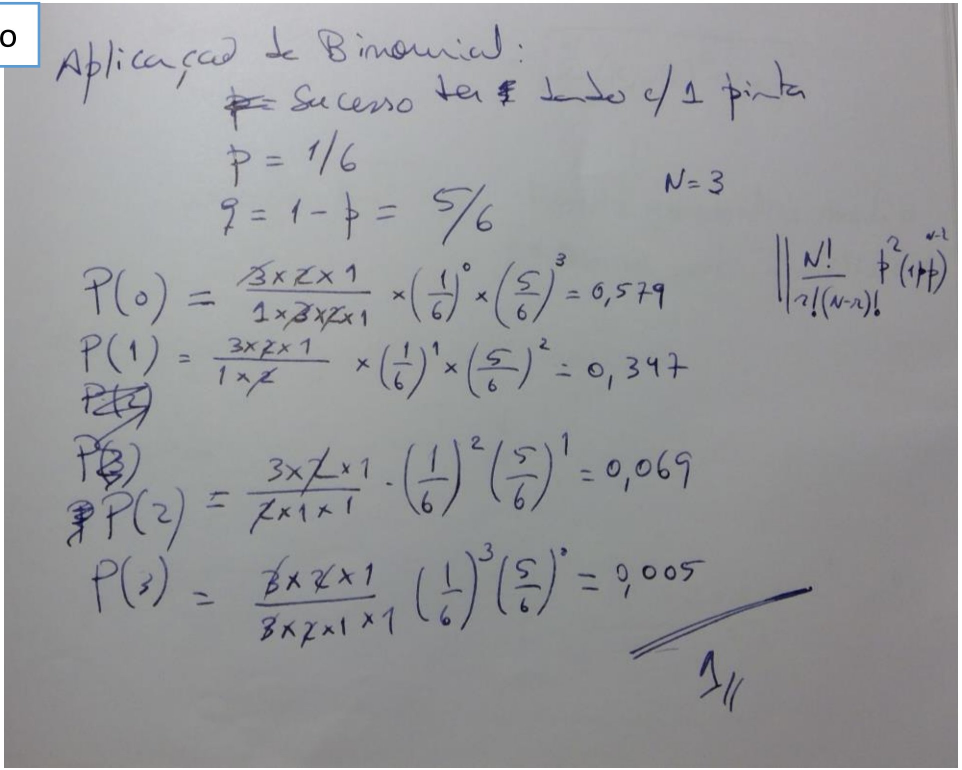
$$(x+y)^N = \sum_{k=0}^{N} {}^{N}C_r \, x^{n-k} y^k$$

1 ensaio saiu “3 ases”

1000 ensaios: em 5 vezes saiu 3 ases

E nos outros ensaios?

O esperado



5 em 1000 vs 0,5% previstos…

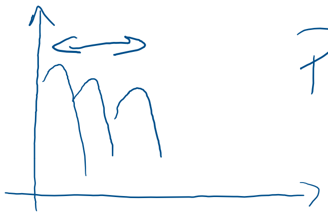
Caracterização da distribuição

- **Média**:

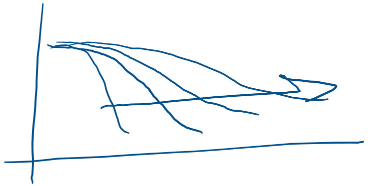
$$\bar{x} = \sum_{i=0}^{N} x_i P(x_i)$$

- **Desvio Padrão**: Desvio quadrático médio

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^{N} (x_i - \bar{x})^2 \cdot P(x_i)} \qquad \sigma^2 = \overline{(x - \bar{x})^2}$$



Posição
↓
Média



Dispersão
↓
σ

Média da binomial

$$\bar{x} = \sum_{i=0}^{N} x_i P(x_i)$$

$$\bar{r} = \sum_{r=0}^{N} r \cdot {}^{N}C_r \cdot p^r (1-p)^{N-r}$$

…

$$\bar{x} = Np$$

$$p \frac{\partial}{\partial p} p^r = r p^r$$

e expansão Binomial

$$\boxed{\bar{x} = Np}$$

Atiramos uma moeda. Quantas caem certas? (cara)

R: 0,5

Atiramos 100 moedas. Quantas caem certas?

R: 50

Muitos ensaios: estimativa da probabilidade

Dispersão da binomial

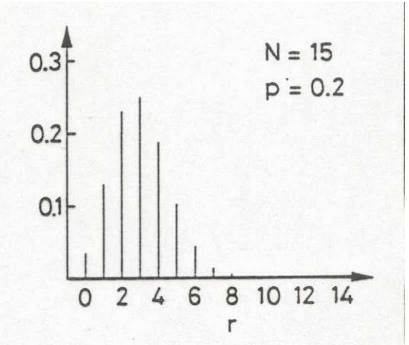
$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^{N} (x_i - \bar{x})^2 \cdot P(x_i)}$$

$$\sigma^2 = \sum_{r=0}^{N} (r - \bar{r})^2 \cdot P(r)$$
$$= \overline{r^2} - \bar{r}^2$$
$$= N \cdot p(1-p)$$
$$= \bar{r}(1-p)$$

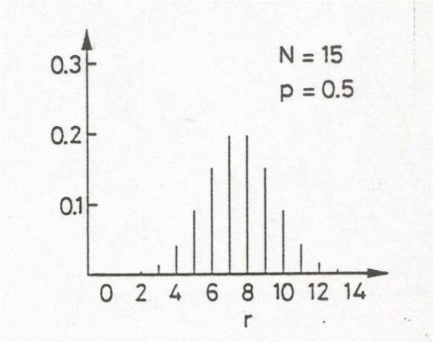
Dispersão relativa

$$\frac{\sigma}{\bar{r}} = \frac{\sqrt{Np(1-p)}}{Np}$$
$$= \sqrt{\frac{1-p}{p}} \frac{1}{\sqrt{N}}$$

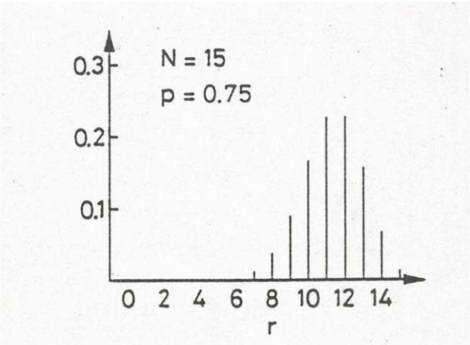
Binomiais



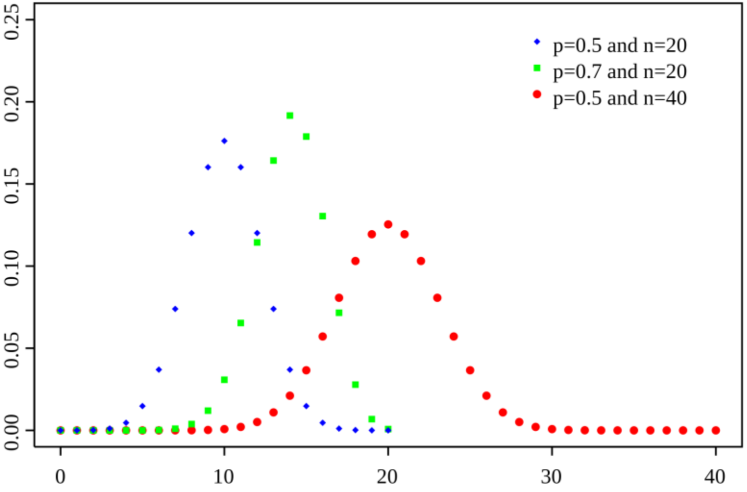
N = 15
p = 0.2
0.3
0.2
0.1
0 2 4 6 8 10 12 14
r



N = 15
p = 0.5
0.3
0.2
0.1
0 2 4 6 8 10 12 14
r



N = 15
p = 0.75
0.3
0.2
0.1
0 2 4 6 8 10 12 14
r



p=0.5 and n=20
p=0.7 and n=20
p=0.5 and n=40
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
0
10
20
30
40

Limite poisson

- Quando **N** é muito grande mas **N.p** é finito a binomial pode ser simplificada como:

$$P(r) = \frac{\mu^r e^{-\mu}}{r!}$$

Sendo $\mu = Np$ finite

N grande

P pequeno

Distribuição poisson

$$P(r) = \frac{\mu^r e^{-\mu}}{r!}$$

- Norma (deve ser 1)

$$\sum_{r=0}^{\infty} P(r) = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\mu^r}{r!} e^{-\mu} = e^{-\mu} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\mu^r}{r!} = e^{-\mu} e^{\mu} = 1$$

- Média (deve ser μ)

$$\bar{r} = \sum_{r=0}^{\infty} r P(r) = \sum_{r=0}^{\infty} r \frac{\mu^r}{r!} e^{-\mu} = e^{-\mu} \sum_{r=1}^{\infty} \frac{\cancel{r} \mu \mu^{r-1}}{\cancel{r}(r-1)!} = e^{-\mu} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\mu^k}{k!} = e^{-\mu} \mu e^{\mu} = \mu$$

- Variância

$$\sigma^2 = \overline{r^2} - \bar{r}^2 = \mu(\mu+1) - \mu^2 = \mu$$

$$\sigma = \sqrt{\mu}$$

Átomos e Poissons

- Os núcleos decaem -> estados de energia mais favoráveis
- Probabilidades baixas
- Elevado número de tentativas (#núcleos)
- Valor médio definido
- Defina-se λ : taxa de decaimento
- Em média num dado tempo decaem $\mu = \lambda \cdot \Delta t$

Independence

- Do we need independent “quantities”?

- Do we need to throw the dices simultaneously?

- What if they are not independent?

Um exemplo

- Mediu-se com muita precisão a taxa de emissão de partículas de uma fonte de tório (thorium) com resultado de 1,5 por minuto
- Quantas partículas em 2 minutos?

$$\mu = \lambda \Delta t = 1{,}5\ {}^{part}/_{min} \cdot 2\,min = 3\,part$$

- E se fizer apenas um ensaio?
  - Então há uma certa probabilidade de sair 0,1,2,3,4,...
  - Qual a probabilidade de sair 3?

$$P(r) = \frac{\mu^r e^{-\mu}}{r!} \rightarrow P(3) = \frac{3^3 e^{-3}}{3!} = 0{,}224 = 22{,}4\%$$

- E num minuto?
  - Pode sair 3?
  - Pode sair 1,5?

Um exemplo

- Fazendo o resto das contas

P(0)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(>=5)
5,0%	14,9%	22,4%	22,4%	16,8%	18%

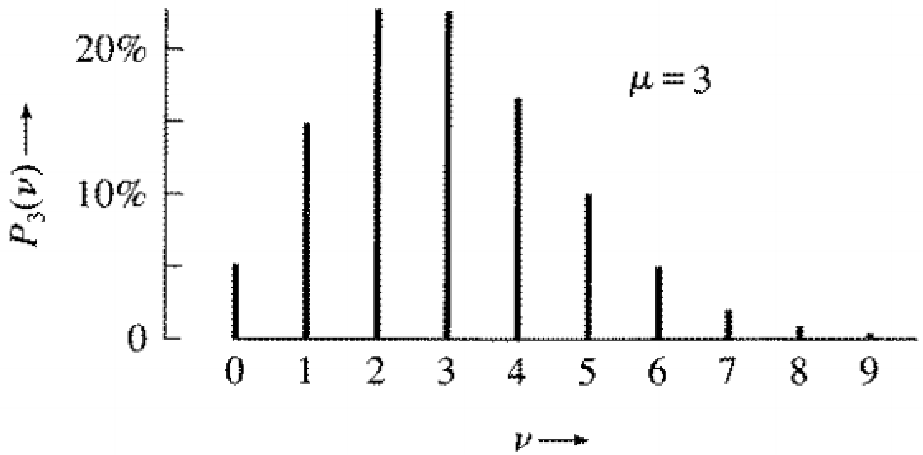
18,5%

???

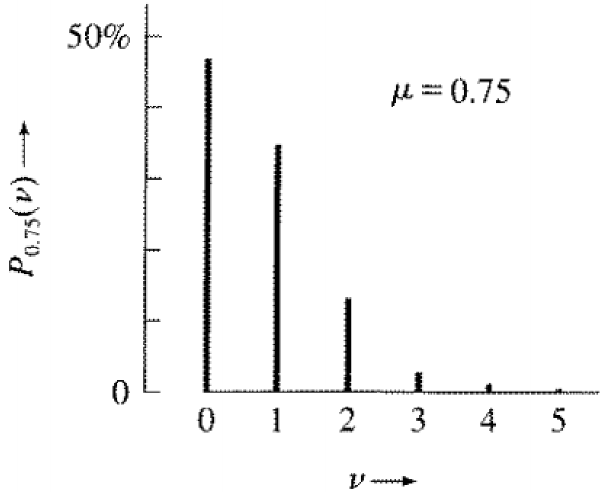
3 não tinha que ser o valor que acontece mais?

E P(5), P6, P7, …. Podemos fazer como $\mathrm{P}(\geq 5) = 1 - P(< 5)$
Ou seja: é o que falta: neste caso 19%

Um exemplo

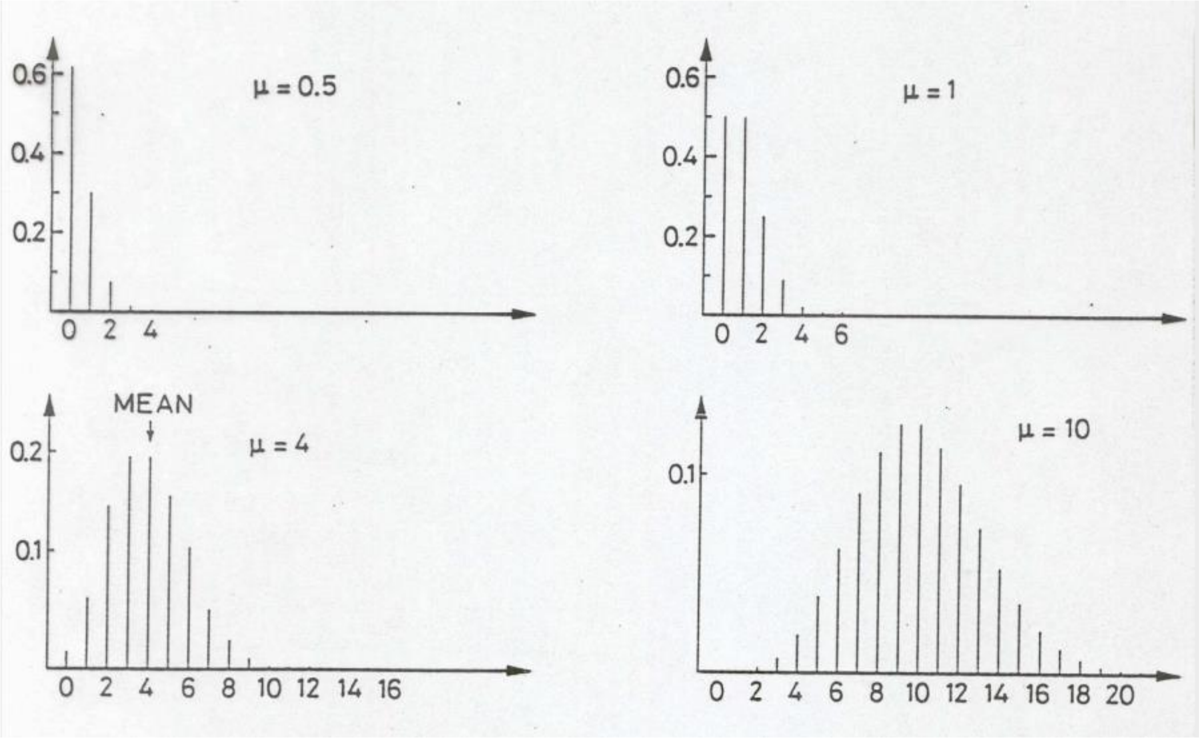


20%
10%
0
$P_3(\nu) \longrightarrow$
$\mu = 3$
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9
$\nu \longrightarrow$



50%
0
$P_{0.75}(\nu) \longrightarrow$
$\mu = 0.75$
0 1 2 3 4 5
$\nu \longrightarrow$

Um exemplo



0.6
0.4
0.2
μ = 0.5
0 2 4
0.6
0.4
0.2
μ = 1
0 2 4 6
MEAN
0.2
0.1
μ = 4
0 2 4 6 8 10 12 14 16
0.1
μ = 10
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20

Um exemplo

- Observou-se a fonte de tório durante 30 minutos e contaram-se 49 coisas.
- Resultado:

$$N = 49 \pm 7$$

- E a rate?

$$R = \frac{49}{30} = 1{,}6 \; {}^{part}\!/_{min}$$

Um exemplo

- E a incerteza?
- $\sigma_R = \frac{7}{30} = 0{,}23333\ {}^{part}/_{min}$
- $R = 1{,}6 \pm 0{,}23333\,{}^{part}/_{min}$

$$R = 1{,}63 \pm 0{,}23\,{}^{part}/_{min}$$

Um exemplo

$$R = 1{,}63 \pm 0{,}23 \ {}^{part}/_{min}$$

Incerteza própria do fenómeno.
Não tem que ver com o instrumento

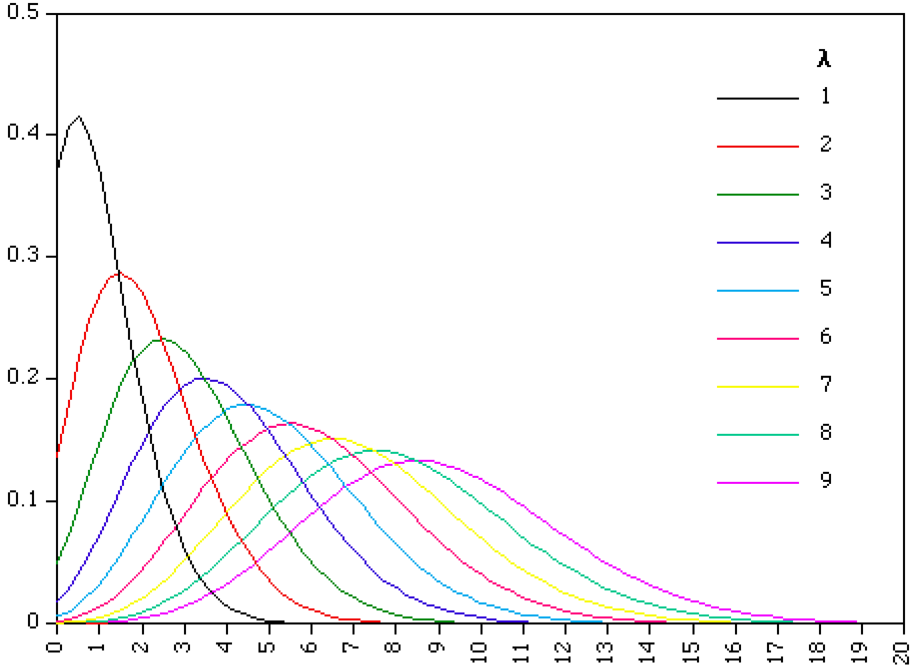
Qual a incerteza no tempo? Interessa?

$$\varepsilon_r(N) = \frac{\varepsilon_N}{N} = \frac{7}{49} = 14\%$$

$$\varepsilon_r(1\ minuto\ em\ 30) = 3\%$$

$$\varepsilon_r(1\ segundo\ em\ 30) = 0{,}05\%$$

The Poisson Distribution



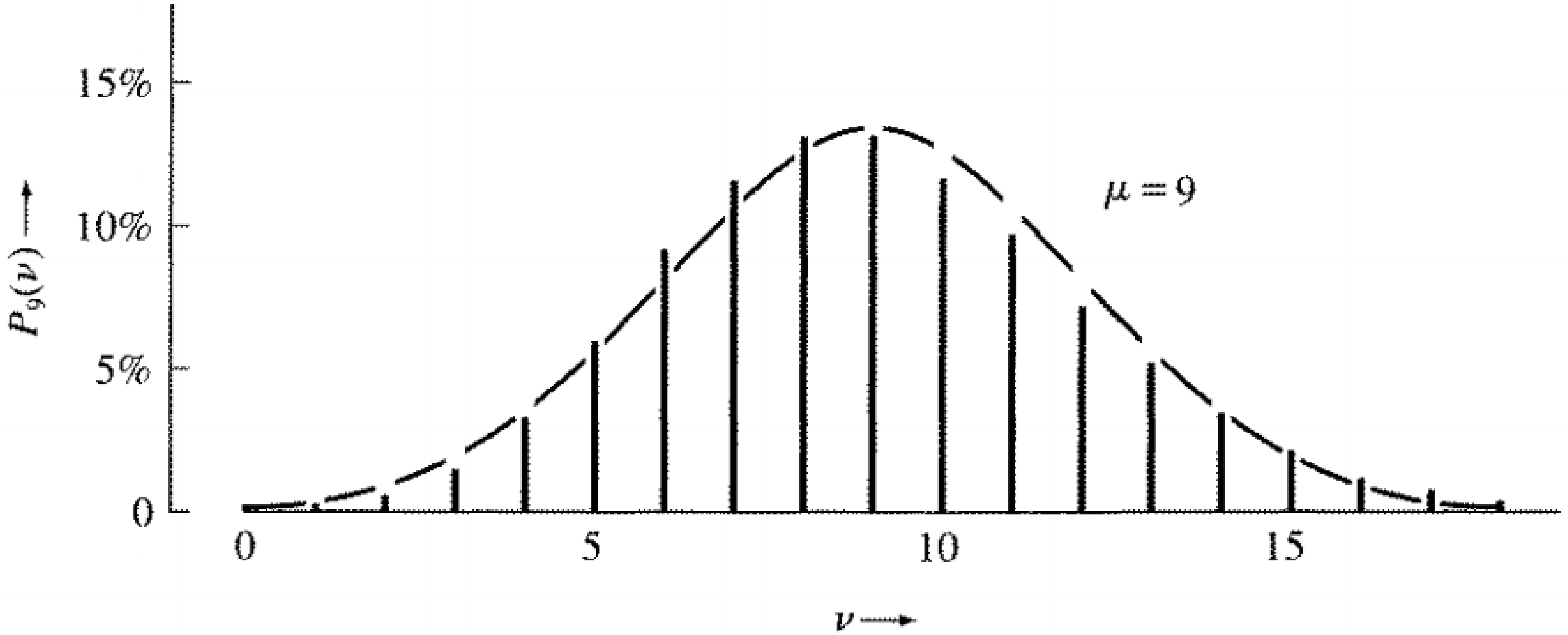


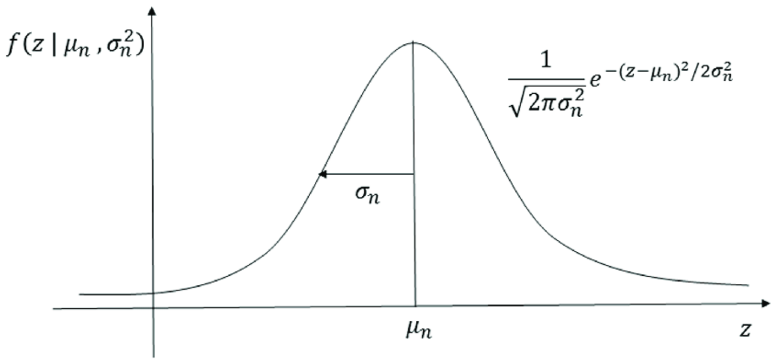
Figure 11.3. The Poisson distribution for $\mu = 9$. The dashed curve is the Gauss distribution with the same mean and standard deviation ($X = 9$ and $\sigma = 3$). As $\mu \rightarrow \infty$, the two distributions become indistinguishable; even when $\mu = 9$, they are very close.

Gaussiana

- Para médias altas existe outra distribuição limite: a gaussiana:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

- Contínua: $\sum_{r=0}^{\infty} P(r) \to \int_{-\infty}^{\infty} P(x)$
- Norma = 1
- Média: μ
- Desvio Padrão: σ
- Simétrica, Bell shaped



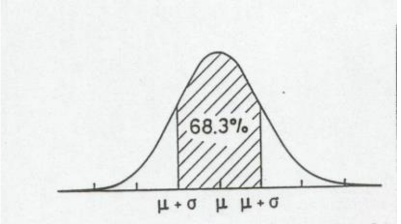
Sigma Gaussiana

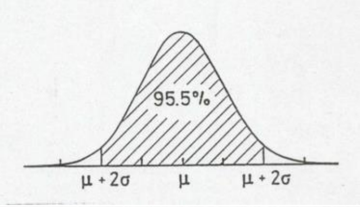
$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

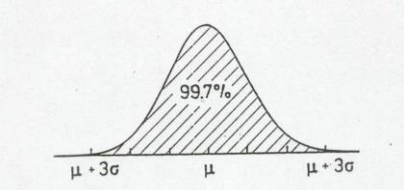
- No caso da gaussiana qual o significado de σ

$$\int_{-\sigma}^{\sigma} P_{Gauss}(x)dx = 0{,}68$$

- 1σ → 68% dos eventos entre $\mu - \sigma$ e $\mu + \sigma$
- 2σ → 95,5% dos eventos entre $\mu - 2\sigma$ e $\mu + 2\sigma$
- 3σ → 99,7% dos eventos entre $\mu - 3\sigma$ e $\mu + 3\sigma$



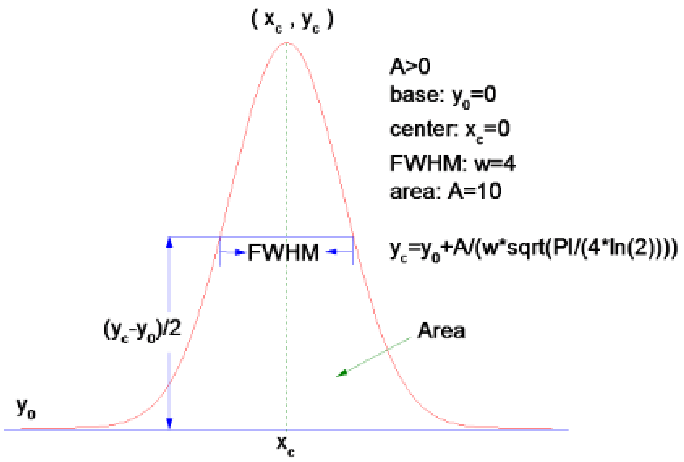




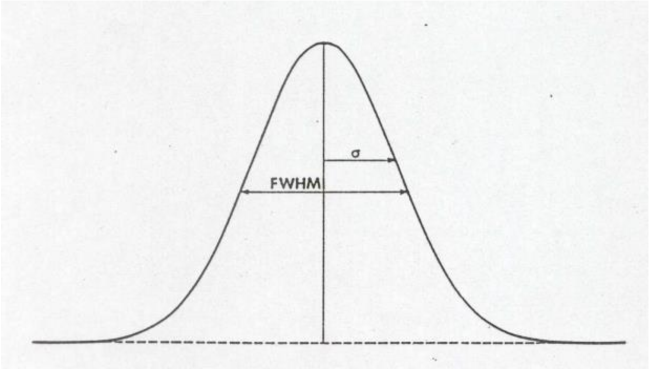
Atenção que também quer dizer que ~32% dos eventos devem estar fora do intervalo de 1σ

E a largura a meia altura?

- FWHM: Largura a meia altura
  - Descobrir o máximo
  - Dividir por 2 (meia altura)
  - Encontrar qual o x à esquerda e à direita: diferença é a largura



- Tem relação directa com sigma:
- FWHM=2.35σ



Resultados

- Adoptamos como resultado o valor médio ±incerteza estatística:

$$\mu \pm \sigma$$

- E quando queremos derivar outras quantidades? Por exemplo uma função $x \rightarrow f(x)$

- $f(x + \delta x) \sim f(x) + f'(x) \cdot \delta x$
- $\delta f(x) = f(x + \delta x) - f(x)$

$$\delta f(x) \sim f'(x) \cdot \delta x$$

Impacto no resultado

Incerteza na variável

- Somando em quadratura outras variáveis:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots)$$

$$\delta f(x_1, x_2, x_3 \dots) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \delta x_i \right)^2}$$

Dois casos práticos

$$f = x + y \longrightarrow \sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$$

$$f = x \cdot y \longrightarrow \sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2$$

$$= y^2 \sigma_x^2 + x^2 \sigma_y^2$$

$$= x^2 y^2 \frac{\sigma_x^2}{x^2} + x^2 y^2 \frac{\sigma_y^2}{y^2}$$

$$= f^2 \left(\frac{\sigma_x^2}{x^2} + \frac{\sigma_y^2}{y^2}\right) \Rightarrow \frac{\sigma_f^2}{f^2} = \frac{\sigma_x^2}{x^2} + \frac{\sigma_y^2}{y^2}$$

exemplos

$$\varepsilon^2(x+y) = \varepsilon^2(x) + \varepsilon^2(y)$$

$$\varepsilon_R^2(x.y) = \varepsilon_R^2(x) + \varepsilon_R^2(y)$$

Manter um olho nos valores absolutos e relativos e perceber de onde vêm e para onde vão

Eg: 1 mm em 10 cm? $\varepsilon_R = 1\%$

$$\varepsilon_f^2 = 3\%^2 + 0{,}1\%^2 + 0{,}001\%^2 + 20\%^2$$

Labs

Tools

- ROOT
  - Package de análise de dados do CERN. Free. Instalado na pampas. O focus da utilização do ROOT é para efectuar a análise dos dados. E.g. fits. Muita coisa pode ser feita interactivamente. Podem ser preparadas e partilhadas rotinas com algumas tarefas básicas
- Overleaf
  - www.overleaf.com
  - Edição latex online grátis
- Zoom
- Teams
- Sugestões?

Nota: Os computadores de aquisição são vintage e merecem respeito. Gravar dados é tarefa morosa

TÉCNICO LISBOA

TÉCNICO LISBOA

TÉCNICO LISBOA