

## Função Geradora de Momentos

## Momentos

Calculamos algumas características de uma variável aleatória  $X$ , tais como  $E(X)$  e  $Var(X)$ , através da distribuição de probabilidade de  $X$

## Momentos

Calculamos algumas características de uma variável aleatória  $X$ , tais como  $E(X)$  e  $Var(X)$ , através da distribuição de probabilidade de  $X$

Vimos que a variância pode ser expressa como uma **função da esperança** das duas primeiras potências de  $X$ , ou seja,

$$Var(X) = E(X^2) - [E(X)]^2$$

## Momentos

Calculamos algumas características de uma variável aleatória  $X$ , tais como  $E(X)$  e  $Var(X)$ , através da distribuição de probabilidade de  $X$

Vimos que a variância pode ser expressa como uma **função da esperança** das duas primeiras potências de  $X$ , ou seja,

$$Var(X) = E(X^2) - [E(X)]^2$$

Outras características da distribuição de probabilidade de  $X$  podem ser expressas por meio das esperanças das potências de  $X$  como por exemplo **coeficientes de assimetria** e **curtose**.

# Momentos

## **i** Definição 01: Momentos

Seja  $X$  uma variável aleatória. Então, o **k-ésimo momento** de  $X$ , denotado por  $\mu'_k$  é definido como,

$$\mu'_k = E(X^k)$$

desde que essa quantidade exista. O **k-ésimo momento central** de uma variável aleatória  $X$ , denotado por  $\mu_k$  é definido como,

$$\mu_k = E\left[X - E(X)\right]^k$$

sempre que essa quantidade existir.

# Momentos

Note que,

$$\blacktriangleright E(X) = \mu'_1$$

# Momentos

Note que,

►  $E(X) = \mu'_1$

►  $Var(X) = \mu_2 = \mu'_2 - [\mu'_1]^2$

# Momentos

Note que,

►  $E(X) = \mu'_1$

►  $Var(X) = \mu_2 = \mu'_2 - [\mu'_1]^2$

► Para qualquer variável aleatória,  $\mu_1 = 0$ .



# Momentos

► Se  $X$  é uma variável aleatória discreta,

$$\mu'_k = E(X^k) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i^k p(x_i)$$

# Momentos

- ▶ Se  $X$  é uma variável aleatória discreta,

$$\mu'_k = E(X^k) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i^k p(x_i)$$

- ▶ Se  $X$  é uma variável aleatória contínua,

$$\mu'_k = E(X^k) = \int_{-\infty}^{\infty} x^k f(x) dx$$

# Momentos

## **i** Exemplo 01: Momentos da distribuição Gamma

Encontre o  $k$ -ésimo momento de  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ .

# Momentos

## **i** Exemplo 01: Momentos da distribuição Gamma

Encontre o  $k$ -ésimo momento de  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ .

**Solução:** Temos que, se  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ , então sua função densidade é dada por,

$$f(x \mid \alpha, \lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda e^{-\lambda x} (\lambda x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

## Momentos

Assim,

$$\begin{aligned} E(X^k) &= \int_0^\infty x^k f(x \mid \alpha, \lambda) dx = \int_0^\infty x^k \frac{\lambda e^{-\lambda x} (\lambda x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} dx \\ &= \int_0^\infty x^k \frac{\lambda e^{-\lambda x} \lambda^{\alpha-1} x^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} dx = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^\infty x^{\alpha+k-1} e^{-\lambda x} dx \end{aligned}$$

Note que a integral é quase a função gama, a não ser pelo termo  $e^{-\lambda x}$ . Seja então a seguinte mudança de variável,

$$u = \lambda x \Rightarrow x = \frac{u}{\lambda}, \quad dx = \frac{du}{\lambda}$$

## Momentos

Assim,

$$\begin{aligned} E(X^k) &= \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^\infty x^{\alpha+k-1} e^{-\lambda x} dx = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^\infty \left(\frac{u}{\lambda}\right)^{\alpha+k-1} e^{-u} \frac{du}{\lambda} \\ &= \frac{\lambda^\alpha}{\lambda^{\alpha+k} \Gamma(\alpha)} \int_0^\infty u^{\alpha+k-1} e^{-u} du = \frac{\lambda^\alpha \Gamma(\alpha + k)}{\lambda^{\alpha+k} \Gamma(\alpha)} \\ &= \frac{\Gamma(\alpha + k)}{\Gamma(\alpha) \lambda^k} \end{aligned}$$

Mas,

$$\Gamma(\alpha + k) = (\alpha + k - 1)(\alpha + k - 2) \cdots (\alpha + 1)\alpha\Gamma(\alpha)$$

## Momentos

De forma que, o  $k$ -ésimo momento de uma variável aleatória  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$  é dado por

$$E(X^k) = \frac{\alpha(\alpha + 1) \cdots (\alpha + k - 1)}{\lambda^k}$$

# Momentos

## **i** Exemplo 02: Momentos da distribuição Weibull

Encontre o  $k$ -ésimo momento de  $X \sim Weibull(\alpha, \beta)$ .



# Momentos

## **i** Exemplo 02: Momentos da distribuição Weibull

Encontre o  $k$ -ésimo momento de  $X \sim Weibull(\alpha, \beta)$ .

**Solução:** Temos que, se  $X \sim Weibull(\alpha, \beta)$ , então sua função densidade é dada por,

$$f(x \mid \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}\right], & x \geq 0, \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

## Momentos

Assim,

$$E(X^k) = \int_0^{\infty} x^k \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}\right] dx$$

Mudança de variável:

$$u = \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta} \Rightarrow x = \alpha u^{1/\beta}, \quad dx = \alpha \frac{1}{\beta} u^{1/\beta-1} du$$

Além disso:

$$x^k = \alpha^k u^{k/\beta}, \quad \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} = u^{(\beta-1)/\beta}, \quad \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}\right] = e^{-u}$$

# Momentos

logo,

$$\begin{aligned} E(X^k) &= \int_0^\infty x^k \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right] dx \\ &= \int_0^\infty \alpha^k u^{k/\beta} \frac{\beta}{\alpha} u^{(\beta-1)/\beta} e^{-u} \alpha \frac{1}{\beta} u^{1/\beta-1} du \\ &= \alpha^k \int_0^\infty u^{\frac{k+\beta}{\beta}-1} e^{-u} du = \alpha^k \Gamma\left(1 + \frac{k}{\beta}\right) \end{aligned}$$

# Função Geradora de Momentos

## **i** Definição 02: Função Geradora de Momentos

Seja  $X$  uma variável aleatória qualquer. A **função geradora de momentos** (FGM) de  $X$ , denotada por  $M_X$ , é definida por

$$M_X(t) = E(e^{tX}),$$

para valores de  $t$  em um intervalo contendo 0 onde a esperança exista.

**Importante:** a função geradora de momentos é função de  $t$ . Para ela existir basta que exista  $\varepsilon > 0$  tal que  $E(e^{tX})$  esteja bem definida para qualquer  $t \in (-\varepsilon, \varepsilon)$ .

# Função Geradora de Momentos

Note que a **definição de função geradora de momentos** é feita independente do tipo de variável, mas a forma de encontrá-la depende se a variável for **discreta** ou **contínua**, isto é,

► Se  $X$  é discreta,

$$M_X(t) = E(e^{tX}) = \sum_{\forall x \in S_X} e^{tx} p_X(x)$$

► Se  $X$  é contínua,

$$M_X(t) = E(e^{tX}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{tx} f_X(x) dx$$

# Função Geradora de Momentos

## **i** Teorema 01

Suponha que a função geradora de momentos de  $X$  exista para  $|t| < \varepsilon$ ,  $\varepsilon > 0$ . Então,  $E(X^k)$  existe para  $k = 1, 2, \dots$  e temos:

$$E(X^k) = \left. \frac{d^k}{dt^k} M_X(t) \right|_{t=0}$$

ou seja, o  $k$ -ésimo momento de  $X$  é igual à derivada de ordem  $k$  de  $M_X(t)$  avaliada em  $t = 0$ .

**Demonstração:** Suponha que a função geradora de momentos de  $X$  exista para todo  $t$  tal que  $|t| < \varepsilon$ , com  $\varepsilon > 0$ , isto é,

$$M_X(t) = E(e^{tX}) < \infty, \quad |t| < \varepsilon$$

## Função Geradora de Momentos

Pela série de Maclaurin da função exponencial, para qualquer número real  $y$  temos

$$e^y = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{y^n}{n!}$$

Aplicando isso a  $y = tX$ , obtemos, para cada  $t$  com  $|t| < \varepsilon$ ,

$$e^{tX} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(tX)^n}{n!} = 1 + tX + \frac{(tX)^2}{2!} + \frac{(tX)^3}{3!} + \dots$$

Temos que  $M_X(t) = E(e^{tX})$ . Logo, admitindo ser válido permutar soma infinita e esperança, temos

## Função Geradora de Momentos

$$M_X(t) = E(e^{tX}) = E\left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(tX)^n}{n!}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} E(X^n), \quad |t| < \varepsilon$$

Portanto,  $M_X(t)$  é dada, em uma vizinhança de 0, por uma série de potência da forma

$$M_X(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n, \quad \text{com } a_n = \frac{E(X^n)}{n!}$$



## Função Geradora de Momentos

Da teoria de séries de potência, sabemos que, se

$$M_X(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n,$$

então a  $k$ -ésima derivada é

$$M_X^{(k)}(t) = \sum_{n=k}^{\infty} a_n n(n-1) \cdots (n-k+1) t^{n-k}$$

# Função Geradora de Momentos

Agora substituímos  $t = 0$ :

Observe:

- ▶ Se  $n > k$ , aparece o fator  $t^{n-k} = 0^{n-k} = 0$ ;
- ▶ Então **todos** os termos com  $n > k$  desaparecem;
- ▶ Só o termo com  $n = k$  permanece.

O único termo sobrevivente é:

$$a_k k(k-1)(k-2)\cdots 1 t^0 = a_k k!$$

## Função Geradora de Momentos

Assim,

$$M_X^{(k)}(0) = a_k k! = \frac{E(X^k)}{k!} k! = E(X^k)$$

Logo,

$$E(X^k) = \left. \frac{d^k}{dt^k} M_X(t) \right|_{t=0}, \quad k = 1, 2, \dots$$

o que mostra que o  $k$ -ésimo momento de  $X$  é igual à derivada de ordem  $k$  da função geradora de momentos avaliada em  $t = 0$ .

# Função Geradora de Momentos

 Dica Importante!

Para qualquer variável aleatória  $X$ :

$$M_X(0) = E(e^{0X}) = 1.$$

Isso sempre deve ocorrer. Use esse fato para verificar se sua FGM está correta.

# Função Geradora de Momentos

## **i** Exemplo 03: Distribuição de Bernoulli

Seja  $X \sim \text{Bernoulli}(p)$ . Encontre sua função geradora de momentos e a partir dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .

## Função Geradora de Momentos

### **i** Exemplo 03: Distribuição de Bernoulli

Seja  $X \sim \text{Bernoulli}(p)$ . Encontre sua função geradora de momentos e a partir dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .

**Solução:** Por definição,

$$M_X(t) = E(e^{tX}) = \sum_{x=0}^1 e^{tx} p^x (1-p)^{1-x}$$

Como  $X$  só assume os valores 0 e 1:

$$M_X(t) = e^{t \cdot 0} p^0 (1-p)^{1-0} + e^{t \cdot 1} p^1 (1-p)^{1-1} = (1-p) + e^t p = 1 - p + e^t p$$

## Função Geradora de Momentos

Portanto,

$$M_X(t) = 1 - p + pe^t, \quad t \in \mathbb{R}$$

Veja que  $M_X(0) = 1 - p + pe^0 = 1 - p + p \times 1 = 1$ . Assim,

► Primeira derivada de  $M_X(t)$ :

$$M'_X(t) = \frac{d}{dt}(1 - p + pe^t) = pe^t$$

Avaliada em  $t = 0$ , temos  $E(X) = M'_X(0) = pe^0 = p$

## Função Geradora de Momentos

► Segunda derivada de  $M_X(t)$ :

$$M_X''(t) = \frac{d}{dt}(M_X'(t)) = \frac{d}{dt}(pe^t) = pe^t$$

Avaliada em  $t = 0$ , temos  $E(X) = M_X''(0) = pe^0 = p$ .

Assim,

$$\text{Var}(X) = M_X''(0) - [M_X'(0)]^2 = p - p^2 = p(1 - p)$$



# Função Geradora de Momentos

## **i** Exemplo 04: Distribuição Binomial

Seja  $X \sim \text{Binomial}(n, p)$ . Encontre sua função geradora de momentos e a partir dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .

# Função Geradora de Momentos

## **i** Exemplo 04: Distribuição Binomial

Seja  $X \sim \text{Binomial}(n, p)$ . Encontre sua função geradora de momentos e a partir dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .

**Solução:** Se  $X \sim \text{Binomial}(n, p)$  então sua f.p. é dada por

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}, \quad k = 0, 1, \dots, n$$

Por definição,

$$M_X(t) = E(e^{tX}) = \sum_{k=0}^n e^{tk} P(X = k) = \sum_{k=0}^n e^{tk} \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}$$

# Função Geradora de Momentos

Escrevendo  $e^{tk} = (e^t)^k$ :

$$M_X(t) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (pe^t)^k (1-p)^{n-k}$$

Temos que o binômio de Newton é dado por:

$$(a+b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k}$$

## Função Geradora de Momentos

Assim, tomando  $a = pe^t$  e  $b = 1 - p$ :

$$M_X(t) = (1 - p + pe^t)^n$$

Portanto,

$$M_X(t) = (1 - p + pe^t)^n, \quad t \in \mathbb{R}$$

Veja que,  $M_X(0) = (1 - p + pe^0)^n = (1 - p + p \times 1)^n = 1^n = 1$ .

# Função Geradora de Momentos

Sabemos que

$$E(X) = M'_X(0)$$

Derivada primeira em relação a  $t$ ,

$$M'_X(t) = \frac{d}{dt}(1 - p + pe^t)^n = n(1 - p + pe^t)^{n-1} \cdot pe^t$$

Logo,

$$M'_X(0) = n(1 - p + pe^0)^{n-1} \cdot pe^0 = n(1 - p + p)^{n-1}p = np$$

## Função Geradora de Momentos

Vamos agora encontrar a segunda derivada. Temos

$$M'_X(t) = npe^t(1 - p + pe^t)^{n-1}$$

Aplicando a regra do produto:

$$\begin{aligned} M''_X(t) &= \frac{d}{dt} \left[ npe^t(1 - p + pe^t)^{n-1} \right] \\ &= npe^t(n-1)(1 - p + pe^t)^{n-2} \cdot pe^t + npe^t(1 - p + pe^t)^{n-1} \end{aligned}$$

# Função Geradora de Momentos

Avaliando em  $t = 0$ :

►  $e^0 = 1$

►  $1 - p + pe^0 = 1 - p + p = 1$

Assim,

$$\begin{aligned}M_X''(0) &= np \cdot 1 \cdot (n-1) \cdot 1^{n-2} \cdot p \cdot 1 + np \cdot 1 \cdot 1^{n-1} \\&= np(n-1)p + np \\&= np[(n-1)p + 1]\end{aligned}$$

## Função Geradora de Momentos

De forma que,

$$\begin{aligned}\text{Var}(X) &= M_X''(0) - [M_X'(0)]^2 \\ &= np[(n-1)p + 1] - (np)^2 \\ &= np[(n-1)p + 1 - np] \\ &= np(1-p)\end{aligned}$$



## Função Geradora de Momentos

### **i** Exemplo 05: Distribuição Geométrica

Seja  $X \sim Geo(p)$ . Encontre sua função geradora de momentos e a partir dela, encontre  $E(X)$  e  $Var(X)$ .

# Função Geradora de Momentos

## **i** Exemplo 05: Distribuição Geométrica

Seja  $X \sim Geo(p)$ . Encontre sua função geradora de momentos e a partir dela, encontre  $E(X)$  e  $Var(X)$ .

**Solução:** Seja  $X \sim Geo(p)$ , cuja função de probabilidade é

$$P(X = k) = p(1 - p)^{k-1}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Por definição, temos que,

$$M_X(t) = E(e^{tX}) = \sum_{k=1}^{\infty} e^{tk} p(1 - p)^{k-1} = p \sum_{k=1}^{\infty} (e^t)^k (1 - p)^{k-1}$$

# Função Geradora de Momentos

Reorganizando,

$$M_X(t) = pe^t \sum_{k=1}^{\infty} [(1-p)e^t]^{k-1}$$

A soma é uma série geométrica com razão

$$r = (1-p)e^t$$

A série converge se e somente se:

$$|(1-p)e^t| < 1$$

# Função Geradora de Momentos

Usando a soma da série geométrica,

$$\sum_{k=0}^{\infty} r^k = \frac{1}{1-r},$$

temos:

$$M_X(t) = \frac{pe^t}{1 - (1-p)e^t}$$

## Função Geradora de Momentos

Portanto,

$$M_X(t) = \frac{pe^t}{1 - (1-p)e^t}, \quad \text{para } t < \ln\left(\frac{1}{1-p}\right)$$

Note que,  $M_X(0) = \frac{pe^0}{1 - (1-p)e^0} = \frac{p}{1 - (1-p)} = \frac{p}{p} = 1$

## Função Geradora de Momentos

Portanto,

$$M_X(t) = \frac{pe^t}{1 - (1-p)e^t}, \quad \text{para } t < \ln\left(\frac{1}{1-p}\right)$$

$$\text{Note que, } M_X(0) = \frac{pe^0}{1 - (1-p)e^0} = \frac{p}{1 - (1-p)} = \frac{p}{p} = 1$$

Sabemos que:

$$E(X) = M'_X(0)$$

## Função Geradora de Momentos

Vamos então encontrar a derivada de primeira ordem de

$$M_X(t) = \frac{pe^t}{1 - (1 - p)e^t}$$

Use regra do quociente, temos

$$M'_X(t) = \frac{pe^t[1 - (1 - p)e^t] - pe^t[-(1 - p)e^t]}{[1 - (1 - p)e^t]^2}$$

Simplificando o numerador:

$$pe^t [1 - (1 - p)e^t + (1 - p)e^t] = pe^t$$

# Função Geradora de Momentos

Portanto,

$$M'_X(t) = \frac{pe^t}{[1 - (1 - p)e^t]^2}$$

Avaliando em  $t = 0$ :

►  $e^0 = 1$

►  $1 - (1 - p)e^0 = 1 - (1 - p) = p$

Logo,

$$E(X) = M'_X(0) = \frac{p}{p^2} = \frac{1}{p}$$



## Função Geradora de Momentos

Encontrando  $\text{Var}(X)$ , usamos,

$$\text{Var}(X) = M_X''(0) - \left[M_X'(0)\right]^2$$

A derivada segunda é dada por

$$M_X''(t) = \frac{pe^t[1 + (1-p)e^t]}{[1 - (1-p)e^t]^3}$$

de forma que

$$M_X''(0) = \frac{p(1 + (1-p))}{p^3} = \frac{p(2-p)}{p^3} = \frac{2-p}{p^2}$$

## Função Geradora de Momentos

e, portanto,

$$\text{Var}(X) = M_X''(0) - \left[ M_X'(0) \right]^2 = \frac{2-p}{p^2} - \left( \frac{1}{p} \right)^2 = \frac{2-p-1}{p^2} = \frac{1-p}{p^2}$$

## Função Geradora de Momentos

e, portanto,

$$\text{Var}(X) = M_X''(0) - \left[M_X'(0)\right]^2 = \frac{2-p}{p^2} - \left(\frac{1}{p}\right)^2 = \frac{2-p-1}{p^2} = \frac{1-p}{p^2}$$

Veja que neste exemplo, a função geradora de momentos de  $X \sim \text{Geo}(p)$  não está definida para todo  $t \in \mathbb{R}$ , mas está bem definida para  $t < \ln\left(\frac{1}{1-p}\right)$ . E como  $\ln\left(\frac{1}{1-p}\right) > 0$ , a função geradora de momentos está bem definida para  $t$  em uma vizinhança de zero.

# Função Geradora de Momentos

## **i** Exemplo 06: Distribuição de Poisson

Seja  $X \sim \text{Poisson}(\lambda)$ . Encontre sua função geradora de momentos e a partir dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .

## Função Geradora de Momentos

### **i** Exemplo 06: Distribuição de Poisson

Seja  $X \sim \text{Poisson}(\lambda)$ . Encontre sua função geradora de momentos e a partir dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .

**Solução:** Seja  $X \sim \text{Poisson}(\lambda)$ , cuja função de probabilidade é

$$P(X = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Assim, a função geradora de momentos (fgm) de  $X$  é dada por,

$$M_X(t) = \sum_{k=0}^{\infty} e^{tk} \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} = e^{-\lambda} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda e^t)^k}{k!}$$

# Função Geradora de Momentos

A série

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda e^t)^k}{k!}$$

é a expansão em série de Taylor de  $e^{\lambda e^t}$ . Assim,

$$M_X(t) = e^{-\lambda} e^{\lambda e^t} = \exp\{\lambda(e^t - 1)\}$$

## Função Geradora de Momentos

Portanto, a fgm de  $X$  é

$$M_X(t) = \exp(\lambda(e^t - 1))$$

Note que,  $M_X(0) = \exp(\lambda(e^0 - 1)) = \exp(0) = 1$

## Função Geradora de Momentos

Portanto, a fgm de  $X$  é

$$M_X(t) = \exp(\lambda(e^t - 1))$$

Note que,  $M_X(0) = \exp(\lambda(e^0 - 1)) = \exp(0) = 1$

Vamos calcular as derivadas de ordem primeira e ordem segunda para calcular os respectivos momentos:

Pela regra da cadeia,

$$M'_X(t) = \exp(\lambda(e^t - 1)) \cdot \lambda e^t = \lambda e^t M_X(t)$$



## Função Geradora de Momentos

Logo,

$$E(X) = M'_X(0) = \lambda e^0 M_X(0) = \lambda \cdot 1 \cdot 1 = \lambda$$

## Função Geradora de Momentos

Logo,

$$E(X) = M'_X(0) = \lambda e^0 M_X(0) = \lambda \cdot 1 \cdot 1 = \lambda$$

A segunda derivada de  $M_X(t)$  é dada por:

$$\begin{aligned} M''_X(t) &= \frac{d}{dt} [\lambda e^t M_X(t)] \\ &= \lambda e^t M_X(t) + \lambda e^t M'_X(t) \\ &= \lambda e^t M_X(t) + \lambda e^t [\lambda e^t M_X(t)] \\ &= \lambda e^t M_X(t) [1 + \lambda e^t] \end{aligned}$$

## Função Geradora de Momentos

Agora, avaliando em  $t = 0$ :

$$M_X''(0) = \lambda e^0 M_X(0) [1 + \lambda e^0] = \lambda \cdot 1 \cdot 1 \cdot (1 + \lambda) = \lambda(1 + \lambda)$$

Portanto,

$$E(X^2) = M_X''(0) = \lambda(1 + \lambda)$$

Assim,

$$\begin{aligned}\text{Var}(X) &= M_X''(0) - \left[M_X'(0)\right]^2 \\ &= \lambda(1 + \lambda) - \lambda^2 \\ &= \lambda\end{aligned}$$

## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 07 - Distribuição Exponencial:** Seja  $X \sim \exp(\lambda)$ . Encontre sua função geradora de momentos e a partir dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .

## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 07 - Distribuição Exponencial:** Seja  $X \sim \exp(\lambda)$ . Encontre sua função geradora de momentos e a partir dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .

**Solução:** Seja  $X \sim \exp(\lambda)$ , cuja função densidade é

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x > 0$$

Neste caso, a função geradora de momentos (fgm) de  $X$  é definida por

$$M_X(t) = E(e^{tX}) = \int_0^{\infty} e^{tx} \lambda e^{-\lambda x} dx = \int_0^{\infty} \lambda e^{-(\lambda-t)x} dx$$

válida para  $t < \lambda$ .

## Função Geradora de Momentos

Assim, como

$$\int_0^{\infty} \lambda e^{-(\lambda-t)x} dx = \lambda \frac{e^{-(\lambda-t)x}}{-(\lambda-t)} \Bigg|_0^{\infty} = \frac{\lambda}{\lambda-t}, \quad \lambda - t > 0$$

Logo,

$$M_X(t) = \frac{\lambda}{\lambda-t}, \quad t < \lambda$$

Note que,  $M_X(0) = \frac{\lambda}{\lambda-0} = 1$

## Função Geradora de Momentos

Derivando,

$$M'_X(t) = \frac{\lambda}{(\lambda - t)^2}$$

Portanto,

$$E(X) = M'_X(0) = \frac{\lambda}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda}$$

## Função Geradora de Momentos

A segunda derivada é dada por,

$$M_X''(t) = \frac{2\lambda}{(\lambda - t)^3}$$

Logo,

$$E(X^2) = M_X''(0) = \frac{2\lambda}{\lambda^3} = \frac{2}{\lambda^2}$$

De forma que,

$$\text{Var}(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 = \frac{2}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2}$$



## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 08 - Distribuição Gamma:** Seja  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ . Encontre sua função geradora de momentos.

## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 08 - Distribuição Gamma:** Seja  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ . Encontre sua função geradora de momentos.

**Solução:** Seja  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ , cuja função densidade é

$$f(x) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x}, \quad x > 0$$

A função geradora de momentos é

$$M_X(t) = \int_0^\infty e^{tx} \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x} dx = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-(\lambda-t)x} dx$$

## Função Geradora de Momentos

Usamos agora o resultado da função Gamma:

$$\int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-bx} dx = \frac{\Gamma(\alpha)}{b^{\alpha}}, \quad b > 0$$

Aqui,  $b = \lambda - t$  (precisamos de  $\lambda - t > 0$ , isto é,  $t < \lambda$ ). Logo,

$$\int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-(\lambda-t)x} dx = \frac{\Gamma(\alpha)}{(\lambda-t)^{\alpha}}$$

Portanto,

$$M_X(t) = \frac{\lambda^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \cdot \frac{\Gamma(\alpha)}{(\lambda-t)^{\alpha}} = \left( \frac{\lambda}{\lambda-t} \right)^{\alpha}, \quad t < \lambda$$

## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 09 - Distribuição Normal Padrão:** Seja  $X \sim N(0, 1)$ . Encontre sua função geradora de momentos.

## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 09 - Distribuição Normal Padrão:** Seja  $X \sim N(0, 1)$ . Encontre sua função geradora de momentos.

**Solução:** Seja  $X \sim N(0, 1)$ , cuja função densidade é

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}, \quad x \in \mathbb{R}$$

Queremos encontrar a função geradora de momentos (fgm) dada por

$$M_X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{tx} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(tx - \frac{x^2}{2}\right) dx$$

## Função Geradora de Momentos

Vamos usar a técnica de completar quadrados no expoente,

$$\begin{aligned} tx - \frac{x^2}{2} &= -\frac{1}{2}(x^2 - 2tx) = -\frac{1}{2}(x^2 - 2tx + t^2 - t^2) \\ &= -\frac{1}{2}[(x - t)^2 - t^2] = -\frac{(x - t)^2}{2} + \frac{t^2}{2} \end{aligned}$$

Assim,

$$M_X(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x - t)^2}{2} + \frac{t^2}{2}\right) dx = \exp\left(\frac{t^2}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x - t)^2}{2}\right) dx$$

# Função Geradora de Momentos

A integral

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x-t)^2}{2}\right) dx$$

é a área total sob a curva de uma normal  $N(t, 1)$ , e portanto é igual a 1.

Logo,

$$M_X(t) = \exp\left(\frac{t^2}{2}\right), \quad t \in \mathbb{R}$$

## Função Geradora de Momentos

**Proposição 01 - Transformações Lineares:** Seja  $X$  uma variável aleatória com função geradora de momentos  $M_X$ . Seja  $Y = aX + b$ . Então, a função geradora de momentos de  $Y$  é dada por

$$M_Y(t) = e^{bt} M_X(at)$$



## Função Geradora de Momentos

**Proposição 01 - Transformações Lineares:** Seja  $X$  uma variável aleatória com função geradora de momentos  $M_X$ . Seja  $Y = aX + b$ . Então, a função geradora de momentos de  $Y$  é dada por

$$M_Y(t) = e^{bt} M_X(at)$$

**Demonstração:**

$$M_Y(t) = E(e^{tY}) = E(e^{t(aX+b)}) = E\left(e^{atX} e^{bt}\right) = e^{bt} E\left(e^{atX}\right) = e^{bt} M_X(at)$$

## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 10 - Distribuição Normal:** Seja  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ . Encontre sua função geradora de momentos.

## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 10 - Distribuição Normal:** Seja  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ . Encontre sua função geradora de momentos.

**Solução:** Se  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , então  $X = \sigma Z + \mu$ , em que  $Z \sim N(0, 1)$ , com função geradora de momentos dada por  $M_Z(t) = \exp\left(\frac{t^2}{2}\right)$ . Assim,

$$M_X(t) = e^{\mu t} M_Z(\sigma t) = e^{\mu t} \exp\left(\frac{(\sigma t)^2}{2}\right) = e^{\mu t} \exp\left(\frac{\sigma^2 t^2}{2}\right)$$

## Função Geradora de Momentos

Logo,

Se  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , então

$$M_X(t) = \exp \left( \mu t + \frac{\sigma^2 t^2}{2} \right)$$

## Função Geradora de Momentos

**Teorema 02:** Se duas variáveis aleatórias têm funções geradoras de momentos que existem, e são iguais, então elas têm a mesma função de distribuição.

## Função Geradora de Momentos

**Teorema 02:** Se duas variáveis aleatórias têm funções geradoras de momentos que existem, e são iguais, então elas têm a mesma função de distribuição.

A demonstração desse Teorema será omitida, pois ela usa conceitos não estudados neste curso. Veja que o Teorema 02 nos mostra que se duas variáveis aleatórias tem mesma função geradora de momentos então estas variáveis aleatórias são identicamente distribuídas.

Isso significa que podemos identificar a distribuição de uma variável aleatória a partir da sua função geradora de momentos, assim como identificamos a distribuição da variável aleatória a partir da sua função de distribuição, função densidade ou função de probabilidade.

## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 11:** Seja  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ . Considere também  $Y = cX$ ,  $c \in \mathbb{R}$ . Mostre, a partir da função geradora de momentos, que  $Y \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda/c)$ .

## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 11:** Seja  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ . Considere também  $Y = cX$ ,  $c \in \mathbb{R}$ . Mostre, a partir da função geradora de momentos, que  $Y \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda/c)$ .

**Solução:** Por definição,

$$M_Y(t) = E(e^{tY}) = E(e^{t(cX)}) = E(e^{(ct)X})$$

Logo,

$$M_Y(t) = M_X(ct) = \left( \frac{\lambda}{\lambda - ct} \right)^\alpha, \quad ct < \lambda \Rightarrow t < \frac{\lambda}{c}$$



## Função Geradora de Momentos

ou seja,

$$M_Y(t) = \left( \frac{\lambda}{\lambda - ct} \right)^\alpha = \left( \frac{\lambda/c}{(\lambda/c) - t} \right)^\alpha, \quad t < \frac{\lambda}{c}$$

Veja que trata-se da função geradora de momentos de uma variável aleatória com distribuição  $Gamma(\alpha, \lambda/c)$ . Logo,  $Y \sim Gamma(\alpha, \lambda/c)$ .

## Função Geradora de Momentos

**Teorema 03 - Soma de variáveis independentes:** Sejam  $X_1, X_2, \dots, X_n$  variáveis aleatórias independentes e funções geradoras de momentos, respectivamente, iguais a  $M_{X_j}(t)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  para  $t$  em alguma vizinhança de zero. Se  $Y = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ , então a função geradora de momentos de  $Y$  existe e é dada por:

$$M_Y(t) = \prod_{j=1}^n M_{X_j}(t)$$

# Função Geradora de Momentos

**Demonstração:** Pela definição, temos

$$\begin{aligned}M_Y(t) &= E(e^{t(X_1+X_2+\dots+X_n)}) \\&= E(e^{tX_1}e^{tX_2} \dots e^{tX_n}) \\&= E(e^{tX_1})E(e^{tX_2}) \dots E(e^{tX_n})\end{aligned}$$

e daí segue o resultado desejado.

## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 12:** Sejam  $X_1, X_2, \dots, X_n$  variáveis aleatórias independentes com distribuição Bernoulli de parâmetro  $p$ . Se  $Y = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ , mostre, a partir da função geradora de momentos, que  $Y \sim \text{Binomial}(n, p)$ .

## Função Geradora de Momentos

**Exemplo 12:** Sejam  $X_1, X_2, \dots, X_n$  variáveis aleatórias independentes com distribuição Bernoulli de parâmetro  $p$ . Se  $Y = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ , mostre, a partir da função geradora de momentos, que  $Y \sim \text{Binomial}(n, p)$ .

**Solução:** Temos que se  $X_1, X_2, \dots, X_n$  são variáveis aleatórias independentes com distribuição Bernoulli de parâmetro  $p$ , então

$$M_{X_j}(t) = 1 - p + pe^t, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

## Função Geradora de Momentos

Então, pelo **Teorema 03**, temos

$$M_Y(t) = \prod_{j=1}^n M_{X_j}(t) = (1 - p + pe^t)^n$$

que corresponde à função geradora de momentos de uma variável aleatória Binomial com parâmetros  $n$  e  $p$ . Logo, temos que  $X_1 + X_2 + \cdots + X_n \sim \text{Binomial}(n, p)$ .

## Função Característica

A **função característica** é uma das ferramentas mais importantes da Teoria das Probabilidades.

## Função Característica

A **função característica** é uma das ferramentas mais importantes da Teoria das Probabilidades.

Ela desempenha um papel similar ao da função geradora de momentos (fgm), mas com vantagens significativas: **sempre existe**, determina unicamente a distribuição e facilita o estudo de somas de variáveis aleatórias.



## Função Característica

A **função característica** é uma das ferramentas mais importantes da Teoria das Probabilidades.

Ela desempenha um papel similar ao da função geradora de momentos (fgm), mas com vantagens significativas: **sempre existe**, determina unicamente a distribuição e facilita o estudo de somas de variáveis aleatórias.

**Definição 03 - Variáveis Aleatórias Complexas:** Dizemos que uma variável aleatória  $X$  é complexa, se pode ser escrita como

$$X = X^a + i X^b$$

em que  $i = \sqrt{-1}$  e  $X^a$  e  $X^b$  são variáveis aleatórias reais.

## Função Característica

Para o valor esperado de  $X$ , no caso complexo, exigimos que as esperanças das duas partes sejam finitas. Assim, temos:

$$E(X) = E(X^a) + i E(X^b)$$

em que  $E(X^a)$  e  $E(X^b)$  são finitas.

## Função Característica

Para o valor esperado de  $X$ , no caso complexo, exigimos que as esperanças das duas partes sejam finitas. Assim, temos:

$$E(X) = E(X^a) + i E(X^b)$$

em que  $E(X^a)$  e  $E(X^b)$  são finitas.

Para efeitos práticos, podemos trabalhar funções complexas como se estivéssemos com funções reais.

## Função Característica

Para o valor esperado de  $X$ , no caso complexo, exigimos que as esperanças das duas partes sejam finitas. Assim, temos:

$$E(X) = E(X^a) + i E(X^b)$$

em que  $E(X^a)$  e  $E(X^b)$  são finitas.

Para efeitos práticos, podemos trabalhar funções complexas como se estivéssemos com funções reais.

As propriedades usuais de números complexos serão usadas. Sendo  $z = a + i b$ , denotaremos por  $|z|$  seu módulo e por  $\bar{z}$  seu conjugado.

# Função Característica

**Definição 04 - Função Característica:** A função característica de uma variável aleatória  $X$  é definida por

$$\varphi_X(t) = E(e^{itX}) = E[\cos(tX)] + i E[\sin(tX)], \quad t \in \mathbb{R},$$

onde  $i = \sqrt{-1}$ .

# Função Característica

## Observações importantes

### 1. Sempre existe

Diferentemente da fgm, que pode divergir,

$$|e^{itX}| = 1 \quad \Rightarrow \quad |E(e^{itX})| \leq 1.$$

Portanto,  $\varphi_X(t)$  está sempre bem definida.

### 2. Determina unicamente a distribuição

Se  $\varphi_X(t) = \varphi_Y(t)$  para todo  $t$ , então

$$X \stackrel{d}{=} Y.$$

# Função Característica

## Observações importantes

### 3. **É sempre contínua**

Aliás, é uniformemente contínua em toda a reta real.

### 4. **Normalização**

Como  $E(e^{it \cdot 0}) = 1$ , temos

$$\varphi_X(0) = 1$$

# Função Característica

## Relação com Momentos

Se  $X$  possui momentos até ordem  $k$ , então:

$$\varphi_X^{(n)}(0) = i^n E(X^n), \quad n = 1, 2, \dots, k.$$

Em particular:

- ▶  $E(X) = -i \varphi_X'(0)$
- ▶  $\text{Var}(X) = -\varphi_X''(0) - [\varphi_X'(0)]^2$



# Função Característica

Propriedade fundamental: soma de variáveis independentes

Se  $X$  e  $Y$  são independentes:

$$\varphi_{X+Y}(t) = E(e^{it(X+Y)}) = E(e^{itX}) E(e^{itY}) = \varphi_X(t) \varphi_Y(t).$$

Esse resultado é crucial, por exemplo, para demonstrar o **Teorema Central do Limite**.

## Função Característica

**Exemplo 13:** Considere uma variável aleatória  $X$  com distribuição Uniforme Contínua no intervalo  $[a, b]$ . Encontre sua função característica.

## Função Característica

**Exemplo 13:** Considere uma variável aleatória  $X$  com distribuição Uniforme Contínua no intervalo  $[a, b]$ . Encontre sua função característica.

**Solução:** Considere  $X \sim U(a, b)$ , com  $a < b$ . Temos que, sua função densidade é dada por

$$f(x) = \frac{1}{b-a}, \quad a \leq x \leq b$$

Assim, a função característica de  $X$  é

$$\varphi_X(t) = E(e^{itX}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{itx} f(x) dx$$

## Função Característica

Como  $f(x)$  é não nula apenas em  $[a, b]$ :

$$\varphi_X(t) = \int_a^b e^{itx} \frac{1}{b-a} dx = \frac{1}{b-a} \int_a^b e^{itx} dx.$$

mudança de variável:  $u = itx \Rightarrow du = it dx$  ou  $dx = \frac{1}{it} du$ . Quando  $x = a \Rightarrow u = ita$ , quando  $x = b \Rightarrow u = itb$ . Assim,

$$\varphi_X(t) = \frac{1}{b-a} \left[ \frac{1}{it} e^u \right]_{ita}^{itb} = \frac{e^{itb} - e^{ita}}{it(b-a)}, \quad t \neq 0$$

## Função Característica

**Exemplo 14:** Seja  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ . Encontre sua função característica.

## Função Característica

**Exemplo 14:** Seja  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ . Encontre sua função característica.

**Solução:** Se  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ . Temos que sua função densidade é

$$f(x) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x}, \quad x > 0$$

Assim, a função característica de  $X$  é

$$\varphi_X(t) = E(e^{itX}) = \int_0^\infty e^{itx} f(x) dx$$

## Função Característica

Substituindo a densidade:

$$\varphi_X(t) = \int_0^{\infty} e^{itx} \frac{\lambda^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x} dx = \frac{\lambda^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-(\lambda-it)x} dx$$

Sabemos que,

$$\int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-bx} dx = \frac{\Gamma(\alpha)}{b^{\alpha}}$$

Assim,

$$\varphi_X(t) = \frac{\lambda^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \cdot \frac{\Gamma(\alpha)}{(\lambda - it)^{\alpha}} = \left( \frac{\lambda}{\lambda - it} \right)^{\alpha}$$

# Função Característica

## Observações importantes

- ▶ A função característica **generaliza** a fgm para o plano complexo.
- ▶ Sempre que a fgm existir, vale:

$$\varphi_X(t) = M_X(it)$$

- ▶ Ambas determinam a distribuição, mas a função característica é **mais poderosa**, pois **sempre existe** e se comporta melhor em operações como soma de variáveis independentes.



## Função Característica

**Exemplo 15:** Seja  $X \sim \text{Binomial}(n, p)$ . Encontre sua função característica e, através dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .

## Função Característica

**Exemplo 15:** Seja  $X \sim \text{Binomial}(n, p)$ . Encontre sua função característica e, através dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .

**Solução:** Se  $X \sim \text{Binomial}(n, p)$ , sua função geradora de momentos é dada por

$$M_X(t) = (1 - p + pe^t)^n$$

Portanto, segue que

$$\varphi_X(t) = M_X(it) = (1 - p + pe^{it})^n$$

## Função Característica

Em geral, se a função característica é  $\varphi_X(t) = E(e^{itX})$ , então

$$\varphi'_X(0) = i E(X) \quad \Rightarrow \quad E(X) = \frac{\varphi'_X(0)}{i}$$

Note que,

$$\varphi_X(t) = g(t)^n, \quad \text{onde} \quad g(t) = 1 - p + pe^{it}$$

e

$$\varphi'_X(t) = ng(t)^{n-1}g'(t) = n(1 - p + pe^{it})^{n-1}pie^{it}$$

## Função Característica

Avaliando em  $t = 0$ :

$$\varphi'_X(0) = n(1-p+pe^{i0})^{n-1} pie^{i0} = n(1-p+pe^0)^{n-1} pie^0 = n(1-p+p)^{n-1} pi = npi$$

Portanto,

$$E(X) = \frac{\varphi'_X(0)}{i} = \frac{inp}{i} = np$$

# Função Característica

Já temos

$$\varphi'_X(t) = n p i e^{it} g(t)^{n-1}, \quad g(t) = 1 - p + p e^{it}$$

Derivando novamente (regra do produto):

$$\begin{aligned} \varphi''_X(t) &= n p i \left[ i e^{it} g(t)^{n-1} + e^{it} (n-1) g(t)^{n-2} g'(t) \right] \\ &= n p i \left[ i e^{it} g(t)^{n-1} + e^{it} (n-1) g(t)^{n-2} (p i e^{it}) \right] \\ &= n p \left[ i^2 e^{it} g(t)^{n-1} + (n-1) p i^2 e^{2it} g(t)^{n-2} \right] \\ &= -n p \left[ e^{it} g(t)^{n-1} + (n-1) p e^{2it} g(t)^{n-2} \right] \end{aligned}$$

## Função Característica

Em  $t = 0$  ( $g(0) = 1$ ,  $e^0 = 1$ ):

$$\varphi_X''(0) = -np[1 \cdot 1^{n-1} + (n-1)p \cdot 1 \cdot 1^{n-2}] = -np[1 + (n-1)p]$$

Então,

$$E(X^2) = -\varphi_X''(0) = np[1 + (n-1)p] = np + n(n-1)p^2$$

## Função Característica

Por fim, como  $\text{Var}(X) = -\varphi_X''(0) - [\varphi_X'(0)]^2$

$$\begin{aligned}\text{Var}(X) &= -\varphi_X''(0) - [\varphi_X'(0)]^2 \\ &= [np + n(n-1)p^2] - (np)^2 \\ &= np + n(n-1)p^2 - n^2p^2 \\ &= np + (n^2 - n - n^2)p^2 \\ &= np - np^2 \\ &= np(1-p)\end{aligned}$$

## Função Característica

**Exemplo 16:** Seja  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ . Encontre sua função característica e, através dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .



## Função Característica

**Exemplo 16:** Seja  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ . Encontre sua função característica e, através dela, encontre  $E(X)$  e  $\text{Var}(X)$ .

**Solução:** Se  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , sua função geradora de momentos é dada por

$$M_X(t) = \exp \left( \mu t + \frac{\sigma^2 t^2}{2} \right)$$

Portanto, segue que

$$\varphi_X(t) = M_X(it) = \exp \left( it\mu - \frac{\sigma^2 t^2}{2} \right)$$

## Função Característica

Derivando:

$$\varphi'_X(t) = (i\mu - \sigma^2 t) \exp\left(it\mu - \frac{\sigma^2 t^2}{2}\right) = (i\mu - \sigma^2 t) \varphi_X(t)$$

Em  $t = 0$ :

$$\varphi_X(0) = 1, \quad \varphi'_X(0) = i\mu$$

Logo,

$$E(X) = \frac{\varphi'_X(0)}{i} = \frac{i\mu}{i} = \mu$$

## Função Característica

Derivamos novamente:

$$\begin{aligned}\varphi_X''(t) &= \frac{d}{dt}[(i\mu - \sigma^2 t)\varphi_X(t)] \\ &= -\sigma^2 \varphi_X(t) + (i\mu - \sigma^2 t)\varphi_X'(t) \\ &= -\sigma^2 \varphi_X(t) + (i\mu - \sigma^2 t)^2 \varphi_X(t)\end{aligned}$$

Em  $t = 0$ :

$$\varphi_X(0) = 1, \quad \varphi_X''(0) = -\sigma^2 + (i\mu)^2 = -\sigma^2 - \mu^2$$

Portanto,

$$E(X^2) = -\varphi_X''(0) = \sigma^2 + \mu^2$$

## Função Característica

De forma que,

$$\text{Var}(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 = (\sigma^2 + \mu^2) - \mu^2 = \sigma^2$$