

# Notas de Aulas - MI401

## Probabilidade

Caio Gomes Alves

04/2025

## Conteúdos

<b>1</b>	<b>Prefácio</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Definições Básicas</b>	<b>3</b>
2.1	Modelo Probabilístico . . . . .	3
2.2	Álgebras de Conjuntos . . . . .	4
2.3	Axiomas de Kolmogorov . . . . .	6
2.4	Propriedades da medida de probabilidade . . . . .	6
2.5	Propriedades de probabilidade . . . . .	8
2.6	Probabilidade Condicional e Independência . . . . .	8
2.7	Fórmula de Poincaré e Teorema de Bayes . . . . .	10
2.8	Exercícios . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Variáveis Aleatórias</b>	<b>29</b>
3.1	Variáveis aleatórias e funções de distribuição . . . . .	29
3.2	Natureza das variáveis aleatórias . . . . .	31
3.3	Variáveis aleatórias e $\sigma$ -álgebra de Borel . . . . .	33
3.4	Variáveis contínuas . . . . .	34
3.5	Variáveis aleatórias multidimensionais . . . . .	35
3.6	Independência . . . . .	37
3.7	Distribuições de funções de vetores . . . . .	39
3.8	Método do Jacobiano . . . . .	43
3.9	Exercícios . . . . .	47

# 1 Prefácio

Este “livro” consiste de notas de aulas da matéria MI401 - Probabilidade, do Programa de Mestrado em Estatística, do Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica (IMECC), da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

Os seus conteúdos são baseados nas notas tomadas durante as aulas, do livro “Probabilidade e Variáveis Aleatórias”, do autor Marcos Nascimento Magalhães, 3ª edição, e do livro “Probabilidade: um curso em nível intermediário”, do autor Barry R. James, 5ª edição.

## 2 Definições Básicas

### 2.1 Modelo Probabilístico

Suponha que é realizado um experimento “sob certas condições”, sendo  $\Omega$  o conjunto de resultados possíveis do experimento (também chamado de resultados elementares). Chamamos  $\Omega$  de **espaço amostral do experimento**, com a representação axiomática sendo dada por:  $\Omega = \{\omega : \omega \in \Omega\}$ .

**Example 2.1.** Considere o lançamento de um dado honesto. Nesse caso, temos que  $\Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , em que cada  $\{i\}$  é um evento elementar, sendo eles  $\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}$  e  $\{6\}$ .

Temos então que eventos são coleções de pontos em  $\Omega$ , por exemplo um evento  $A = \{2, 4, 6\}$  (números pares no lançamento de um dado honesto). Assim, temos as seguintes suposições para eventos:

1. Todo resultado possível no experimento corresponde a um e somente um  $\omega \in \Omega$ ;
2. Resultados diferentes correspondem a elementos diferentes em  $\Omega$ .

**Definition 2.1.** Seja um espaço amostral  $\Omega$  de um experimento. Todo subconjunto  $A \subset \Omega$  é um evento.  $\Omega$  é o evento certo e  $\emptyset$  é o evento impossível. Além disso,  $\omega \in \Omega \rightarrow \{\omega\}$  é um evento elementar.

Note-se que, dados  $A$  e  $B$  eventos, tais que  $A \subset \Omega$  e  $B \subset \Omega$ , temos que:

- $A \cup B \rightarrow (\omega \in A \text{ e } \omega \notin B) \text{ ou } (\omega \notin A \text{ e } \omega \in B) \text{ ou } (\omega \in A \text{ e } \omega \in B)$ ;
- $A \cap B \rightarrow (\omega \in A \cup \omega \in B)$ ;
- $A^c \rightarrow (\omega \notin A)$ ;
- $A \subset B \rightarrow$  a ocorrência de  $A$  implica a ocorrência de  $B$ ;
- $A \cap B = \emptyset \rightarrow$  os eventos  $A$  e  $B$  são mutuamente exclusivos.

No campo probabilístico, pensamos em atribuir probabilidades (leia-se chances) a eventos em  $\Omega$ .

**Definition 2.2** (Clássica). A probabilidade de ocorrência de um evento  $A$ , denotada por  $P(A)$  é dada por:

$$P(A) = \frac{\#(A)}{\#(\Omega)} = \frac{\text{nº de resultados favoráveis a } A}{\text{nº de resultados possíveis em } \Omega}$$

Onde  $\#$  indica a cardinalidade de um conjunto (quantidade de elementos no conjunto).

**Example 2.2.** Seja  $A = \{2, 4, 6\}$ , os lançamentos pares em um dado honesto. Como  $\Omega = \{1, \dots, 6\}$ , temos que:

$$P(A) = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}$$

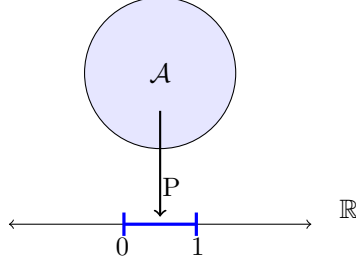
Note que o conjunto  $A$  pode ser descrito como a união dos eventos elementares, tais que  $A = \{2\} \cup \{4\} \cup \{6\}$ . Nesse caso, podemos ver que a probabilidade de  $A$  não muda, pois:

$$\begin{aligned} P(\{i\}) &= \frac{\#(\{i\})}{\#(\Omega)} = \frac{1}{6} \\ P(A) &= \frac{\#(\{2\}) + \#(\{4\}) + \#(\{6\})}{\#(\Omega)} = \frac{1 + 1 + 1}{6} = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

**Definition 2.3.** Um evento  $A$  ao qual atribuímos uma probabilidade é um evento aleatório.

## 2.2 Álgebras de Conjuntos

Considere o conjunto de eventos em uma família  $\mathcal{A}$  (subconjuntos de  $\Omega$ ), de tal modo que  $P : \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$ . Uma representação gráfica da relação  $P$  pode ser dada por:



**Definition 2.4.** Seja  $\Omega$  um conjunto não-vazio. Seja  $\mathcal{A}$  uma classe de subconjuntos de  $\Omega$ , ela será chamada de “Álgebra de subconjuntos de  $\Omega$ ”, caso respeite os seguintes axiomas:

- $Ax_1$  :  $\Omega \in \mathcal{A}$ , e definimos  $P(\Omega) = 1$ ;
- $Ax_2$  : Se  $A \in \mathcal{A} \Rightarrow A^c \in \mathcal{A}$ , e definimos  $P(A^c) = 1 - P(A)$ ;
- $Ax_3$  : Se  $A \in \mathcal{A}, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \cup B \in \mathcal{A}$ .

E por consequência desses axiomas, temos as seguintes extensões:

- $Ax_4$  :  $\emptyset \in \mathcal{A}$ ;
- $Ax_5$  : Sejam  $A_1, A_2, \dots, A_n : A_i \in \mathcal{A} \forall i \Rightarrow \bigcup_{i=1}^n A_i \in \mathcal{A}$  e  $\bigcap_{i=1}^n A_i \in \mathcal{A}$ .

É fácil verificar a extensão de  $Ax_4$  a partir de  $Ax_1$  e  $Ax_2$ :  $Ax_1$  define que  $\Omega \in \mathcal{A}$ , e por  $Ax_2$  temos que  $\Omega^c \in \mathcal{A}$ , e por definição temos que  $\Omega^c = \emptyset$ , logo  $\emptyset \in \mathcal{A}$ . Também é interessante notar que, ainda por  $Ax_2$ , temos que  $P(\emptyset) = 1 - P(\Omega)$ , e por  $Ax_1$  temos que  $P(\Omega) = 1$ , portanto  $P(\emptyset) = 1 - 1 = 0$ .

A extensão de  $Ax_5$  é dada por indução e pelas Leis de De Morgan: Sejam  $A_1, A_2 \in \mathcal{A}$ . Temos pelo axioma  $Ax_3$ , que  $A_1 \cup A_2 \in \mathcal{A}$ , podendo assim definir o conjunto  $B = A_1 \cup A_2$ , sendo possível ver que  $B \in \mathcal{A}$ . Sejam ainda um conjunto  $A_3 \in \mathcal{A}$ , podemos ver que  $B \cup A_3 \in \mathcal{A}$ , e como  $B = A_1 \cup A_2$ , temos que  $(A_1 \cup A_2) \cup A_3 \in \mathcal{A}$ . Podemos proceder dessa forma para qualquer quantidade (enumerável) de conjuntos, de modo que  $\bigcup_{i=1}^n A_i \in \mathcal{A}$ . Pelas Leis de De Morgan, sabemos que:

$$\bigcap_{i=1}^n A_i = \left( \bigcup_{i=1}^n A_i^c \right)^c \quad (1)$$

E pela extensão indutiva em  $n$  do axioma  $Ax_2$ , temos que se  $A_i^c \in \mathcal{A}, \forall i$ , então  $\bigcup_{i=1}^n A_i^c \in \mathcal{A}$ . E como, se um conjunto pertence a  $\mathcal{A}$  seu complementar deve pertencer também, e pelo resultado em (1), temos então que:

$$\left( \bigcup_{i=1}^n A_i^c \right)^c = \left( \bigcap_{i=1}^n A_i \right) \in \mathcal{A} \quad (2)$$

Assim provamos o axioma  $A_5$  como extensão indutiva dos axiomas anteriores, indicando que tanto a união quanto a interseção dos  $A_i$  pertencem à  $\mathcal{A}$ . Podemos também mostrar que a álgebra  $\mathcal{A}$  é fechada também para a operação de diferença entre conjuntos:  $A \in \mathcal{A}, B \in \mathcal{A}, A - B = A \cap B^c \in \mathcal{A}$ .

*Proof.* Considerando que os conjuntos  $A$  e  $B$  pertencem à  $\mathcal{A}$ , podemos utilizar o axioma  $Ax_2$  para mostrar que  $A^c \in \mathcal{A}$  e  $B^c \in \mathcal{A}$ . A partir disso, por meio do axioma  $Ax_5$  temos que os seguintes conjuntos também pertencem à  $\mathcal{A}$ :  $A \cup B, A \cup B^c, A^c \cup B, A^c \cup B^c, A \cap B, A \cap B^c, A^c \cap B, A^c \cap B^c$ . E como temos que  $A \cap B^c = A - B$ , temos a prova de que  $A - B \in \mathcal{A}$ . Além disso, essa prova mostra que a diferença contrária ( $B - A = A^c \cap B$ ) também pertence à álgebra  $\mathcal{A}$ .  $\square$

Ainda considerando os conjuntos  $A$  e  $B$ , existem cinco maneiras como esses conjuntos podem “interagir”, e podemos mostrar que em todos os casos a diferença  $A - B \in \mathcal{A}$ :

- $A \not\subset B$  e  $A \not\supset B$  e  $A \cap B \neq \emptyset \Rightarrow A - B = A \cap B^c \in \mathcal{A}$ ;
- $A \not\subset B$  e  $A \not\supset B$  e  $A \cap B = \emptyset \Rightarrow A - B = A \in \mathcal{A}$ ;
- $A \supset B \Rightarrow A - B = A \cap B^c \in \mathcal{A}$ ;
- $A \subset B \Rightarrow A - B = \emptyset \in \mathcal{A}$ ;
- $A = B \Rightarrow A - B = \emptyset \in \mathcal{A}$ .

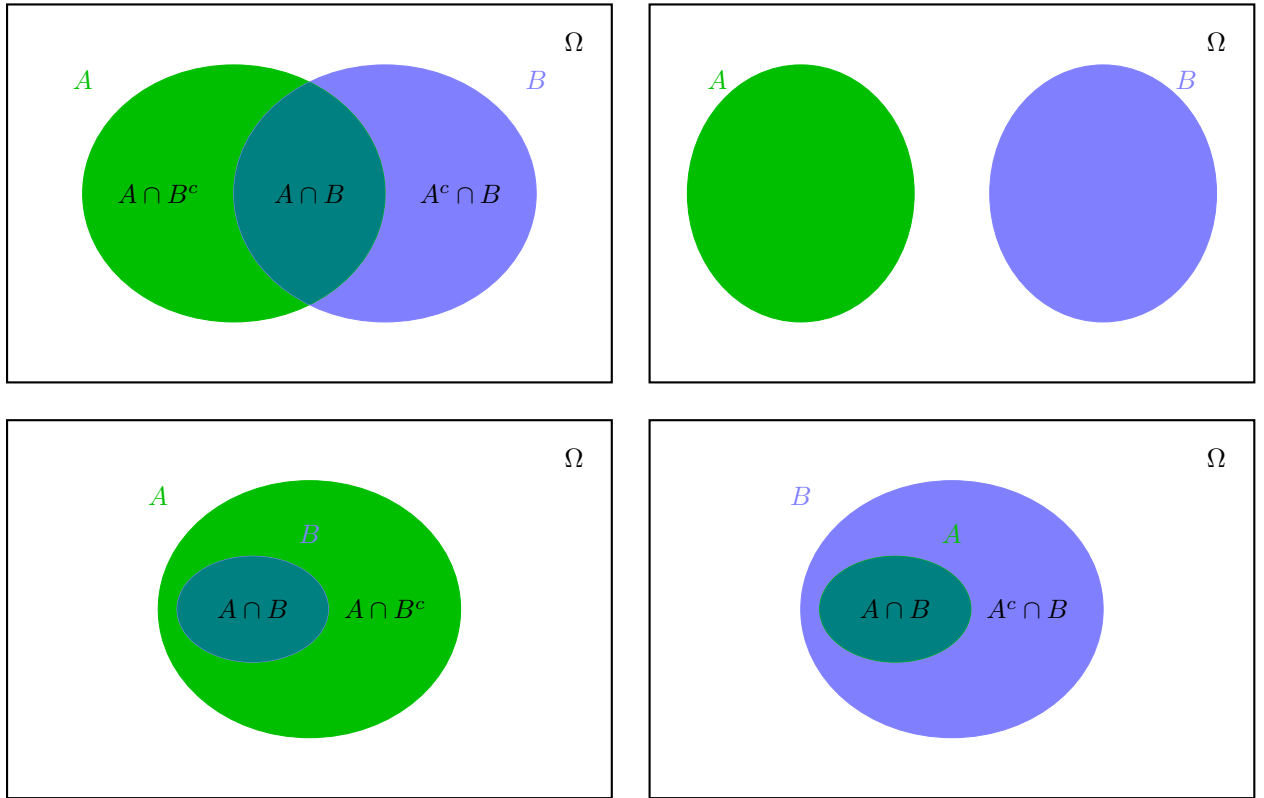


Figure 1: Diferentes relações entre  $A$  e  $B$  demonstradas por Diagramas de Venn. Note que em todos os casos,  $A \cap B^c \in \mathcal{A}$  ou  $A \cap B^c = \emptyset \in \mathcal{A}$  ou  $A \cap B^c = A \in \mathcal{A}$

As representações por Diagramas de Venn apresentadas na figura 2.2 não é prova formal de que a álgebra  $\mathcal{A}$  é fechada para a diferença, mas é um recurso visual que pode auxiliar no entendimento da relação entre os conjuntos.

**Definition 2.5.** Uma classe  $\mathcal{A}$  de conjuntos/subconjuntos de  $\Omega \neq \emptyset$ , verificando os axiomas  $Ax_1, Ax_2$  e  $Ax_3$  é chamada de  $\sigma$ -álgebra de subconjuntos de  $\Omega$ .

Note que uma  $\sigma$ -álgebra é sempre uma álgebra. Uma outra forma de construir  $\sigma$ -álgebras é partir de uma álgebra munida dos axiomas de Kolmogorov (Teorema de Carathéodory).

**Proposition 2.1.** Seja  $\mathcal{A}$  uma  $\sigma$ -álgebra de subconjuntos de  $\Omega$ , se  $A_1, A_2, \dots$ , é uma coleção em  $\mathcal{A} \Rightarrow \bigcap_{i=1}^{\infty} A_i \in \mathcal{A}$ .

**Example 2.3.** Seja  $\Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  (o lançamento de um dado cúbico usual). A  $\sigma$ -álgebra usual é definida da seguinte forma e denotada por  $\mathcal{P}(\Omega)$  (chamada de partes de  $\Omega$  ou *powerset* de  $\Omega$ ):

$$\begin{aligned}\mathcal{A} = \{ & \emptyset, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \\ & \{1, 2\}, \{1, 3\}, \{1, 4\}, \{1, 5\}, \{1, 6\}, \\ & \{2, 3\}, \{2, 4\}, \dots, \\ & \Omega\}\end{aligned}$$

**Example 2.4.** Definamos a  $\sigma$ -álgebra de Borel no intervalo  $\Omega = [0, 1]$ . Uma possível definição seria:

$$\mathcal{A} = \text{ todos os subconjuntos de } [0, 1] \text{ cujo comprimento esteja bem definido}$$

Podemos, por exemplo, propor uma álgebra para o intervalo  $[0, 1]$  dada por:

$$\mathcal{A}_r = \{A \subset [0, 1] : A \text{ é uma união finita de intervalos} \}$$

É possível encontrar um conjunto  $A$  tal que  $A \notin \mathcal{A}$ , por exemplo:

$$A = \left\{ \left(0, \frac{1}{2}\right) \cup \left(\frac{1}{2}, \frac{3}{4}\right) \cup \dots \cup \left(1 - \frac{1}{2^n}, 1 - \frac{1}{2^{n+1}}\right) \cup \dots \right\}$$

Podemos ver que, para qualquer  $n^*$  finito,  $\lim_{n \rightarrow n^*} \left(1 - \frac{1}{2^{n+1}}\right) \neq 1$ , de modo que o conjunto  $A$  não cobrirá completamente o intervalo  $[0, 1]$ . Dessa forma, a  $\sigma$ -álgebra de Borel no intervalo  $[0, 1]$  (denotada  $\mathcal{B}_{[0,1]}$ ) é definida como:

$$\mathcal{B}_{[0,1]} = \{A : A \subset [0, 1] \text{ e } A \text{ é boreliano}\}$$

Onde boreliano denota que  $A$  é união enumerável (finita ou infinita) de intervalos em  $[0, 1]$

## 2.3 Axiomas de Kolmogorov

Seja  $P : \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$ , com:

- $Ax_1(K) : P(A) \geq 0, \forall A \in \mathcal{A}$ ;
- $Ax_2(K) : P(\Omega) = 1$ ;
- $Ax_3(K) : \text{Se } A_1, A_2, \dots, A_n : A_i \in \mathcal{A} \forall i \text{ e } A_i \cap A_j = \emptyset \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}, i \neq j \Rightarrow P\left(\bigcup_{k=1}^n A_k\right) = \sum_{k=1}^n P(A_k).$

**Definition 2.6.** Seja  $\Omega$  um conjunto não-vazio,  $\mathcal{A}$  uma  $\sigma$ -álgebra em  $\Omega$ , com  $P : \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$ , verificando os axiomas de Kolmogorov, então  $P$  é dita finitamente aditiva. Podemos assim, modificar o axioma  $Ax_3(K)$  para:

- $Ax'_3(K) : \text{Se } A_1, A_2, \dots \text{ é uma sequência em } \mathcal{A} \text{ tal que } \forall i \neq j, A_i \cap A_j = \emptyset, \text{ tem-se que } P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n).$  (*propriedade da  $\sigma$ -aditividade*)

**Definition 2.7.**  $P$  definida em uma  $\sigma$ -álgebra  $\mathcal{A}$ , satisfazendo os axiomas de Kolmogorov ( $Ax_1(K), Ax_2(K), Ax'_3(K)$ ) é uma medida de probabilidade em  $\mathcal{A}$ , constituída pela terna  $(\Omega, \mathcal{A}, P)$ .

## 2.4 Propriedades da medida de probabilidade

**Proposition 2.2** (Continuidades).

1. Seja  $\{A_i\}_{i=1}^{\infty}$  uma sequência (crescente) de eventos tais que  $A_1 \subseteq A_2 \subseteq A_3 \subseteq \dots$ , e seja  $A = \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i$ , então  $P(A) = \lim_{i \rightarrow \infty} P(A_i)$ .
2. Seja  $\{B_i\}_{i=1}^{\infty}$  uma sequência (decrescente) de eventos tais que  $B_1 \supseteq B_2 \supseteq B_3 \supseteq \dots$ , e seja  $B = \bigcap_{i=1}^{\infty} B_i$ , então  $P(B) = \lim_{i \rightarrow \infty} P(B_i)$ .

*Proof.*

1. Note que, sendo  $A_0 = \emptyset$ , tem-se que  $A = (A_1 - A_0) \cup (A_2 - A_1) \cup (A_3 - A_2) \cup \dots$ , ou seja,  $A$  é união disjunta de eventos  $D_i = A_i - A_{i-1}$ , de forma que  $A_{i-1} \subseteq A_i \Rightarrow P(A_i) = P(A_{i-1}) + P(A_i - A_{i-1}) \Rightarrow P(A_i - A_{i-1}) = P(A_i) - P(A_{i-1})$ . Logo, temos que:

$$\begin{aligned}
 A = \bigcup_{i=1}^{\infty} D_i &\xrightarrow{Ax'_3(K)} P(A) = \sum_{i=1}^{\infty} P(D_i) \\
 &= \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i - A_{i-1}) \\
 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n [P(A_i) - P(A_{i-1})] \\
 &= \lim_{n \rightarrow \infty} [P(A_1) - P(A_0) + P(A_2) - P(A_1) + P(A_3) - P(A_2) + \dots] \\
 &= \lim_{n \rightarrow \infty} P(A_n)
 \end{aligned}$$

2. Note que, por De Morgan,  $B = \bigcap_{i=1}^n B_i = (\bigcup_{i=1}^n B_i^c)^c$ . Logo  $P(\bigcap_{i=1}^n B_i) = 1 - P(\bigcup_{i=1}^n B_i^c)$ . Seja  $A = B_i^c$  de modo que:

$$\begin{aligned}
 B_1^c &= \Omega - B_1 = A_1 \\
 B_2^c &= (B_1 - B_2) \cup (\Omega - B_1) = A_2 \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

Assim  $A_1 \subseteq A_2 \subseteq A_3 \subseteq \dots$ , e com isso  $P(\bigcap_{i=1}^n B_i) = 1 - P(\bigcup_{i=1}^n B_i^c) = 1 - P(\bigcup_{i=1}^n A_i)$ . Por outro lado, tem-se que  $A = \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i = \bigcup_{i=1}^{\infty} B_i^c \Rightarrow A^c = (\bigcup_{i=1}^{\infty} B_i^c)^c = \bigcap_{i=1}^{\infty} B_i = B$ . Logo, temos que:

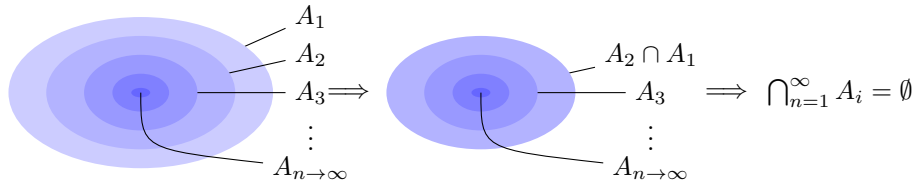
$$P\left(\bigcap_{i=1}^n B_i\right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} (1 - P(A)) = P(A^c) = P(B)$$

□

**Definition 2.8** (Continuidade no vazio).

- $Ax_4(K)$  : Se  $\{A_n\}_{n \geq 1} \subseteq \mathcal{A}$  e  $A_n \supseteq A_{n+1} \forall n$  e  $\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n \neq \emptyset$  então  $P(A_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$

A prova dessa definição é dada pela segunda parte da prova da proposição 2.2. A representação visual é dada pelo seguinte diagrama:



**Proposition 2.3.** Dados os axiomas  $Ax_1(K), Ax_2(K), Ax_3(K)$ , o axioma 4 é equivalente ao axioma  $Ax'_3(K)$ , ou seja, uma probabilidade finitamente aditiva é uma medida de probabilidade se e somente se é contínua no vazio.

A prova de que a  $\sigma$ -aditividade implica o axioma 4 é consequência da prova da proposição anterior, dado que  $\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n = \emptyset$ . Para demonstrar o contrário (que  $Ax_1(K) + Ax_2(K) + Ax_3(K) + Ax_4(K) \rightarrow Ax'_3(K)$ ), tomemos uma sequência infinita de eventos  $\{A_i\}_{i \geq 1}$  em  $\mathcal{A}$  :  $A_i \cap A_j = \emptyset \forall i \neq j$ . Devemos ver que  $P(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n)$ . Seja  $A = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n = (\bigcup_{n=1}^k A_n) \cup (\bigcup_{n=k+1}^{\infty} A_n)$ . Tem-se que:

$$P(A) = P\left(\bigcup_{n=1}^k A_n\right) + P\left(\bigcup_{n=k+1}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=1}^k P(A_n) + P\left(\bigcup_{n=k+1}^{\infty} A_n\right)$$

Seja  $B_k = \bigcup_{n=k+1}^{\infty} A_n$ . Note que  $B_k \downarrow \emptyset$  quando  $k \rightarrow \infty$  de modo que  $P(B_k) \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} 0$ , logo:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^k P(A_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n)$$

**Corollary 2.1.** *Os seguintes sistemas são equivalentes:*

$$Ax_1(K), Ax_2(K), Ax'_3(K) \equiv Ax_1(K), Ax_2(K), Ax_3(K), Ax_4(K)$$

## 2.5 Propriedades de probabilidade

Seja  $P$  uma probabilidade em uma  $\sigma$ -álgebra  $\mathcal{A}$ . Suponhamos que todo  $A$  abaixo pertença à  $\mathcal{A}$ . Então as seguintes propriedades são consequências dos axiomas:

- **P1:**  $P(A^c) = 1 - P(A)$ ;
- **P2:**  $0 \leq P(A) \leq 1$ ;
- **P3:**  $A_1 \subset A_2 \Rightarrow P(A_1) \leq P(A_2)$ ;
- **P4:**  $P(\bigcup_{i=1}^n A_i) \leq \sum_{i=1}^n P(A_i)$ ;
- **P5:**  $P(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i) \leq \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i)$ ;

Com essas propriedades, podemos então definir um modelo probabilístico. Sejam:

- **a)** Um espaço amostral:  $\Omega \neq \emptyset$ ;
- **b)** Uma  $\sigma$ -álgebra em  $\Omega$ :  $\mathcal{A}$ ;
- **c)** Uma medida de probabilidade em  $\mathcal{A}$ :  $P$ .

**Definition 2.9.** Um espaço de probabilidade é uma terna  $(\Omega, \mathcal{A}, P)$  seguindo **a, b e c**.

## 2.6 Probabilidade Condicional e Independência

Considere o seguinte experimento: um dado é lançado duas vezes e anota-se a dupla de resultados. Temos que:

$$\Omega = \{(i, j) : 1 \leq i \leq 6; 1 \leq j \leq 6; i, j, \in \mathbb{Z}\}$$

Sejam os seguintes eventos:

- $A = \text{"em cada lançamento o valor observado é } \leq 2\text{"}$ ;
- $B = \text{"a soma dos resultados é igual a 4"}$ .

$$A = \{(1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2)\}$$

$$B = \{(1, 3), (3, 1), (2, 2)\}$$

Já que  $\#\Omega = |\Omega| = 36$ , e pela equiprobabilidade dos eventos (considerando que os dados são honestos), temos que:



$$P(A) = \frac{|A|}{|\Omega|} = \frac{4}{36}$$

$$P(B) = \frac{|B|}{|\Omega|} = \frac{3}{36}$$

Além disso,  $(A \cap B) = \{(2, 2)\}; P(A \cap B) = 1/36$ . Suponha que  $A$  ocorre com  $P(A) > 0$ , e que  $B$  é o evento de interesse. Assumindo a potencial ocorrência de  $A$ , qual é a probabilidade de  $B$  ocorrer. Nesse caso  $P(B|A) = 1/4$ .

**Definition 2.10** (Probabilidade condicional). Sejam  $A$  e  $B$  eventos em  $\mathcal{A}$ , com  $P(A) > 0$ . A probabilidade condicional  $P(B|A)$  é definida como:

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad (3)$$

ou equivalentemente:

$$P(A \cap B) = P(B|A)P(A) \quad (4)$$

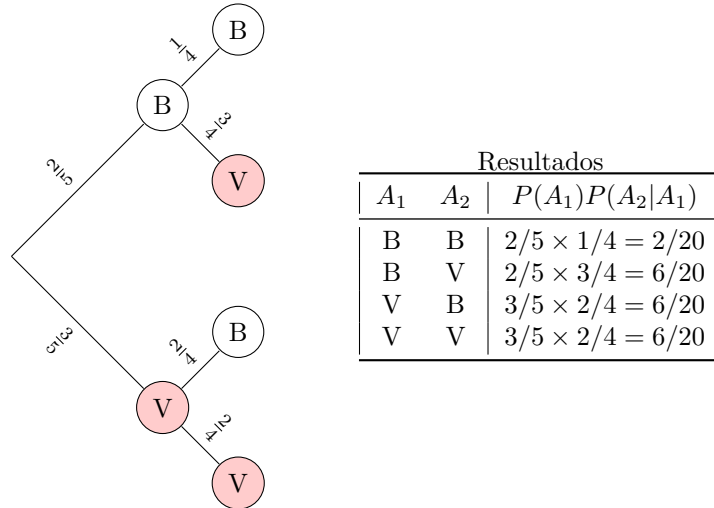
**Example 2.5.** Considere uma urna com 5 bolas, sendo 3 vermelhas e 2 brancas. O experimento consiste de 2 retiradas sucessivas de uma bola da urna (sem reposição). Considere os eventos  $A_1 = \text{Cor da primeira bola}$  e  $A_2 = \text{Cor da segunda bola}$ :

$$P(A_1 = B) = \frac{2}{5}, \quad P(A_1 = V) = \frac{3}{5}$$

$$P(A_2 = B|A_1 = B) = \frac{1}{4}, \quad P(A_2 = V|A_1 = B) = \frac{3}{4}$$

$$P(A_2 = B|A_1 = V) = \frac{2}{4}, \quad P(A_2 = V|A_1 = V) = \frac{2}{4}$$

Podemos visualizar esse experimento com os seguintes diagrama e tabela de probabilidades:



**Definition 2.11** (Eventos independentes).

- a) Os eventos  $A$  e  $B$  são independentes (denotados como  $A \perp B$ ) se  $P(A \cap B) = P(A)P(B)$ ;
- b)  $\{A_i, i \in \mathbb{I}\}$  são independentes se  $P(\bigcap_{i \in \mathcal{J}} A_i) = \prod_{i \in \mathcal{J}} P(A_i)$ ,  $\forall$  subfamílias  $\mathcal{J}$  de índices em  $\mathbb{I}$ .

Disso segue que, sendo  $A$  e  $B$  dois eventos, as seguintes propriedades são válidas:

1. Se  $P(A) = 0 \Rightarrow P(A \cap B) = 0 \forall B$ , ou seja,  $A \perp B$ ;
2. Se  $P(B) = 1 \Rightarrow P(A \cap B) = P(A) \forall A$ , ou seja,  $A \perp B$ ;
3.  $A$  é independente dele mesmo se e somente se  $P(A) = 0$  ou  $P(A) = 1$ ;
4.  $A \perp B \Rightarrow A \perp B^c, A^c \perp B, A^c \perp B^c$ ;
5. As seguintes proposições são equivalentes:
  - a)  $(A \perp B) \Rightarrow P(B|A) = P(B)$  e  $P(B|A^c) = P(B)$ ;
  - b)  $P(B|A) = P(B) \Rightarrow A \perp B$ ;
  - c)  $P(B|A^c) = P(B) \Rightarrow A \perp B$ .

**Theorem 2.1** (Teorema das Probabilidades Totais).

1. Dados  $A$  e  $B$  eventos em  $\mathcal{F}$ :

$$P(A) = P(A|B)P(B) + P(A|B^c)P(B^c)$$

2. No geral, se  $B_1, B_2, \dots, B_n$  é uma partição de  $\Omega$ , então:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i)P(B_i) \quad (5)$$

**Demonstração:** Note que  $A = (A \cap B) \cup (A \cap B^c)$  e  $(B \cap B^c) = \emptyset$  e  $(B \cup B^c) = \Omega$ . Além disso,  $(A \cap B) \cap (A \cap B^c) = \emptyset$ , logo  $P(A) = P(A \cap B) + P(A \cap B^c)$ . Como, por definição,  $P(A|B) = P(A \cap B)/P(B)$  e  $P(A|B^c) = P(A \cap B^c)/P(B^c)$ , temos que:

$$P(A) = P(A|B)P(B) + P(A|B^c)P(B^c)$$

Para o caso geral, temos que  $\{B_i\}_{i=1}^n$ ,  $(B_i \cap B_j) = \emptyset \forall i, j$  e  $\bigcup_{i=1}^n B_i = \Omega$ . Logo:

$$\begin{aligned} A &= (A \cap B_1) \cup (A \cap B_2) \cup \dots \cup (A \cap B_n) \\ &\Downarrow \text{Pela } \sigma\text{-aditividade} \\ P(A) &= \sum_{i=1}^n P(A \cap B_i) \end{aligned}$$

E como  $P(A|B_i) = P(A \cap B_i) / P(B_i)$ :

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i)P(B_i)$$

## 2.7 Fórmula de Poincaré e Teorema de Bayes

**Theorem 2.2** (Fórmula de Poincaré). *Seja  $\{A_i\}_{i \geq 1} \subseteq \mathcal{F}$ . Então:*

$$\begin{aligned} P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) &= \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P(A_{i_1} \cap A_{i_2}) + \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < i_3 \leq n} P(A_{i_1} \cap A_{i_2} \cap A_{i_3}) - \dots \\ &\quad + (-1)^{n+1} P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n) \end{aligned} \quad (6)$$

A demonstração da fórmula (6) é dada no exercício 2.10.

**Theorem 2.3** (Teorema de Bayes). *Seja  $\{B_i\}_{i=1}^n$  uma partição de  $\Omega$  e  $A$  um evento em  $\mathcal{F}$ , temos que:*

$$P(B_i|A) = \frac{P(A|B_i)P(B_i)}{\sum_{j=1}^n P(A|B_j)P(B_j)} \quad (7)$$

O denominador de (7) é derivado do teorema das probabilidades totais, visto que  $\{B_i\}_{i=1}^n$  é uma partição de  $\Omega$ .

**Lemma 2.1.** *Sejam  $A_1, A_2, \dots, A_n$  eventos em  $\mathcal{F}$ , logo:*

$$P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = P(A_1)P(A_2|A_1)P(A_3|A_1 \cap A_2) \dots P(A_n|A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_{n-1})$$

*Proof.* Suponha a validade do lema anterior. Logo, seja  $D = (\bigcap_{i=1}^n A_i)$ :

$$\begin{aligned} P(A_1 \cap \dots \cap A_n \cap A_{n+1}) &= P(D \cap A_{n+1}) \\ &= P(D)P(A_{n+1}|D) \\ &= P(A_1)P(A_2|A_1) \dots P(A_n|A_1 \cap \dots \cap A_{n-1})P(A_{n+1}|A_1 \cap \dots \cap A_n) \end{aligned}$$

□

## 2.8 Exercícios

**Exercise 2.1** (BJ1). Sejam  $A, B$  e  $C$  eventos aleatórios. Identifique as seguintes equações e frases, casando cada equação expressa na notação de conjuntos com a correspondente frase na linguagem de eventos:

$A \cap B \cap C = A \cup B \cup C$	$A$ e "B ou C" são incompatíveis.
$A \cap B \cap C = A$	Os eventos A,B e C são idênticos.
$A \cup B \cup C = A$	A ocorrência de A implica a de "B e C".
$(A \cup B \cup C) - (B \cup C) = A$	A ocorrência de A decorre de "B ou C".

**Exercise 2.2** (BJ2). A partir dos axiomas, prove a propriedade P5:

$$P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n)$$

*Proof.* Consideremos uma prova por indução para  $n \rightarrow \infty$ :

Para  $n = 2$ :

$$P(A_1 \cup A_2) = P(A_1) + P(A_1^c \cap A_2)$$

Considerando que  $(A_1^c \cap A_2) \subset A_2$  e o fato de que  $(A_1) \cap (A_1^c \cap A_2) = \emptyset$ , temos pela propriedade P3 que  $P(A_1^c \cap A_2) \leq P(A_2)$ , de modo que:

$$\begin{aligned} P(A_1 \cup A_2) &= P(A_1) + P(A_1^c \cap A_2) \leq P(A_2) \\ &\leq P(A_1) + P(A_2) \\ &\leq \sum_{i=1}^2 P(A_i) \end{aligned}$$

De modo semelhante, podemos fazer para  $n$ :

$$\begin{aligned} P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) &= P(A_1) + P(A_1^c \cap A_2) + \dots \\ &\leq P(A_1) + P(A_2) + \dots \\ &\leq \sum_{i=1}^n P(A_i) \end{aligned}$$

Consideremos então uma sequência de eventos  $A_i^*, \forall i \in \{n+1, n+2, \dots\}$ , disjuntos de  $A_i$ . Denotemos ainda  $A = (\bigcup_{i=1}^n A_i) \cup (\bigcup_{i=n+1}^{\infty} A_i)$ . Pela aditividade infinita (ou ainda pela  $\sigma$ -aditividade), temos que:

$$P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) \leq \sum_{i=1}^n P(A_i) + P\left(\bigcup_{i=n+1}^{\infty} A_i\right)$$

Que por serem disjuntos, pelo axioma  $Ax_4$  tem que  $(\bigcup_{i=n+1}^{\infty} A_i) \downarrow \emptyset$ , de modo que  $P(\bigcup_{i=n+1}^{\infty} A_i) \rightarrow 0$ . Logo, tem-se que:

$$P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n)$$

□

**Exercise 2.3** (BJ3). Sejam  $A_1, A_2, \dots$  eventos aleatórios. Mostre que:

a)  $P(\bigcap_{k=1}^n A_k) \geq 1 - \sum_{k=1}^n P(A_k^c)$

*Proof.* Por De Morgan temos que  $\bigcap_{k=1}^n A_k = (\bigcup_{k=1}^n A_k^c)^c$ , de modo que:

$$\begin{aligned} P\left(\bigcap_{k=1}^n A_k\right) &= P\left(\bigcup_{k=1}^n A_k^c\right)^c \\ &= 1 - P\left(\bigcup_{k=1}^n A_k^c\right) \xrightarrow{\text{Por P4}} P\left(\bigcup_{k=1}^n A_k^c\right) \leq \sum_{k=1}^n P(A_k^c) \\ &\geq 1 - \sum_{k=1}^n P(A_k^c) \end{aligned}$$

□

b) Se  $P(A_k) \geq 1 - \epsilon$  para  $k = 1, 2, \dots, n$ , então  $P(\bigcap_{k=1}^n A_k) \geq 1 - n\epsilon$

*Proof.* É fácil ver que:

$$P(A_k) \geq 1 - \epsilon \Rightarrow P(A_k^c) \leq 1 - (1 - \epsilon) = \epsilon$$

E de modo semelhante ao que foi feito na questão anterior (utilizando De Morgan), temos que:

$$\begin{aligned} P\left(\bigcap_{k=1}^n A_k\right) &= P\left(\bigcup_{k=1}^n A_k^c\right)^c = 1 - P\left(\bigcup_{k=1}^n A_k^c\right) \\ &\geq 1 - \sum_{k=1}^n P(A_k^c) \\ &\geq 1 - \sum_{k=1}^n \epsilon \\ &\geq 1 - n\epsilon \end{aligned}$$

□

c)  $P(\bigcap_{k=1}^\infty A_k) \geq 1 - \sum_{k=1}^\infty P(A_k^c)$

*Proof.* De maneira semelhante ao que foi visto na prova da letra **a**, temos que:

$$\begin{aligned} P\left(\bigcap_{k=1}^\infty A_k\right) &= P\left(\bigcup_{k=1}^\infty A_k^c\right)^c \\ &= 1 - P\left(\bigcup_{k=1}^\infty A_k^c\right) \xrightarrow{\text{Por P5}} P\left(\bigcup_{k=1}^n A_k^c\right) \leq \sum_{k=1}^\infty P(A_k^c) \\ &\geq 1 - \sum_{k=1}^\infty P(A_k^c) \end{aligned}$$

Para ver a demonstração da propriedade P5, vide exercício 2.2.

□

**Exercise 2.4** (BJ4). Demonstre as seguintes propriedades:

a) Se  $P(A_n) = 0$  para  $n = 1, 2, \dots$ , então  $P(\bigcup_{n=1}^\infty A_n) = 0$ .

*Proof.* Utilizando a propriedade *P5*, temos que:

$$\begin{aligned}
P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) &\leq \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n) \\
&\leq \sum_{n=1}^{\infty} 0 \\
&\leq 0 \\
&\downarrow \text{ Por } P2 \\
P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) &= 0
\end{aligned}$$

□

b) Se  $P(A_n) = 1$  para  $n = 1, 2, \dots$ , então  $P(\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n) = 1$ .

*Proof.* Levando em consideração que se  $P(A_n) = 1 \Rightarrow P(A_n^c) = 0$  (pela propriedade *P1*), utilizando De Morgan e a prova da letra **c** do exercício 2.3, temos que:

$$\begin{aligned}
P\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n\right) &\geq 1 - \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n^c) \\
&\geq 1 - \sum_{n=1}^{\infty} 0 \\
&\geq 1 - 0 \\
&\geq 1 \\
&\downarrow \text{ Por } P2 \\
P\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n\right) &= 1
\end{aligned}$$

□

**Exercise 2.5** (BJ6). Seja  $\Omega$  um conjunto não-vazio.

a) Prove: se  $\mathcal{A}$  e  $\mathcal{B}$  são  $\sigma$ -álgebras de subconjuntos de  $\Omega$ , então  $(\mathcal{A} \cap \mathcal{B})$  também é uma  $\sigma$ -álgebra.

*Proof.* Para que  $\mathcal{A} \cap \mathcal{B}$  seja uma  $\sigma$ -álgebra, é necessário que cumpram-se os axiomas  $Ax_1$ ,  $Ax_2$  e  $Ax_3$ :

- $Ax_1$ : Sabemos que  $\Omega \in \mathcal{A}$  e  $\Omega \in \mathcal{B}$ , logo sabemos que  $\Omega \in (\mathcal{A} \cap \mathcal{B})$ ;
- $Ax_2$ : Seja um evento  $E \in (\mathcal{A} \cap \mathcal{B})$ , sabemos então que  $E \in \mathcal{A}$  e  $E \in \mathcal{B}$ , logo  $E^c \in \mathcal{A}$  e  $E^c \in \mathcal{B}$ , portanto  $E^c \in (\mathcal{A} \cap \mathcal{B})$ ;
- $Ax_3$ : Sejam dois eventos,  $E_1 \in (\mathcal{A} \cap \mathcal{B})$  e  $E_2 \in (\mathcal{A} \cap \mathcal{B})$ . Com isso, temos que  $E_1, E_2 \in \mathcal{A}$  e  $E_1, E_2 \in \mathcal{B}$ , portanto  $(E_1 \cup E_2) \in \mathcal{A}$  e  $E_1 \cup E_2 \in \mathcal{B}$ , logo  $(E_1 \cup E_2) \in (\mathcal{A} \cap \mathcal{B})$ .

Como os três axiomas foram cumpridos, temos que  $(\mathcal{A} \cap \mathcal{B})$  é uma  $\sigma$ -álgebra.

□

b) Generalize o item (a): se  $\mathcal{A}_i, i \in \mathcal{I}$ , são  $\sigma$ -álgebras de partes de  $\Omega$ , onde  $\mathcal{I}$  é um conjunto não-vazio de índices, então  $\bigcap_{i \in \mathcal{I}} \mathcal{A}_i$  também é uma  $\sigma$ -álgebra.

*Proof.* Como anteriormente, temos que mostrar que  $\bigcap_{i \in \mathcal{I}} \mathcal{A}_i$  cumpre os axiomas  $Ax_1$ ,  $Ax_2$  e  $Ax_3$ :

- $Ax_1$ : Sabemos que  $\Omega \in \mathcal{A}_i$ ,  $\forall i \in \mathcal{I}$ , logo sabemos que  $\Omega \in \bigcap_{i \in \mathcal{I}} \mathcal{A}_i$ ;
- $Ax_2$ : Seja um evento  $E \in \bigcap_{i \in \mathcal{I}} \mathcal{A}_i$ , sabemos então que  $E \in \mathcal{A}_i$ ,  $\forall i \in \mathcal{I}$ , logo  $E^c \in \mathcal{A}_i$ ,  $\forall i \in \mathcal{A}$ , portanto  $E^c \in \bigcap_{i \in \mathcal{I}} \mathcal{A}_i$ ;
- $Ax_3$ : Sejam dois eventos,  $E_1 \in \bigcap_{i \in \mathcal{I}} \mathcal{A}_i$  e  $E_2 \in \bigcap_{i \in \mathcal{I}} \mathcal{A}_i$ . Com isso, temos que  $E_1, E_2 \in \mathcal{A}_i$ ,  $\forall i \in \mathcal{I}$ , portanto  $(E_1 \cup E_2) \in \mathcal{A}_i$ ,  $\forall i \in \mathcal{I}$ , logo  $(E_1 \cup E_2) \in \bigcap_{i \in \mathcal{I}} \mathcal{A}_i$ .

Vemos portanto que, por cumprir os axiomas  $Ax_1$ ,  $Ax_2$  e  $Ax_3$ ,  $\bigcap_{i \in \mathcal{I}} \mathcal{A}_i$  é também uma  $\sigma$ -álgebra.  $\square$

c) Seja  $\mathbb{C}$  uma classe de subconjuntos de  $\Omega$ . Mostre que existe *pelo menos uma*  $\sigma$ -álgebra que contém  $\mathbb{C}$ .

*Proof.* É fácil ver que a maior classe de subconjuntos de  $\Omega$  é o conjunto das partes de  $\Omega$ , denotado como  $\mathcal{P}(\Omega)$  (definido no exemplo 2.3). Assim, temos que  $\mathbb{C} \subseteq \mathcal{P}(\Omega)$ , de modo que, pelo menos a  $\sigma$ -álgebra formada por  $\mathcal{P}(\Omega)$  contém  $\mathbb{C}$ .  $\square$

d) Visando a plena utilização dos itens (b) e (c), como você definiria “a menor  $\sigma$ -álgebra contendo  $\mathbb{C}$ ”, onde  $\mathbb{C}$  é uma classe de subconjuntos de  $\Omega$ ?

*Proof.* Considere que temos  $\sigma$ -álgebras de partes de  $\Omega$ ,  $\mathcal{A}_i$  com  $i \in \mathbb{I}$  (sendo  $\mathbb{I}$  um conjunto não-vazio de índices), tais que  $\mathbb{C} \in \mathcal{A}_i : \forall i \in \mathbb{I}$ . Assim, sabemos que algum dos  $\mathcal{A}_i$  é a menor  $\sigma$ -álgebra que contém  $\mathbb{C}$ , de modo que  $\bigcap_{i \in \mathbb{I}} \mathcal{A}_i$  será a menor  $\sigma$ -álgebra que contém  $\mathbb{C}$ .  $\square$

**Exercise 2.6** (BJ9). Uma caixa contém  $2n$  sorvetes,  $n$  do sabor  $A$  e  $n$  do sabor  $B$ . De um grupo de  $2n$  pessoas,  $a < n$  preferem o sabor  $A$ ,  $b < n$  o sabor  $B$  e  $2n - (a + b)$  não tem preferência. Demonstre: se os sorvetes são distribuídos ao acaso, a probabilidade de que a preferência de todas as pessoas seja respeitada é de  $\binom{2n-a-b}{n-a} / \binom{2n}{n}$ .

*Proof.* Sabendo que a ordem de entrega dos  $n$  sorvetes de cada sabor, para as  $2n$  pessoas não importa, temos que a quantidade possível de entregas diferentes é:

$$|\Omega| = \binom{2n}{n}$$

Considere que o evento  $R$  indica o caso em que todos tiveram sua preferência respeitada. Podemos ver que:

$$P(R) = \frac{|R|}{|\Omega|} = \frac{|R|}{\binom{2n}{n}}$$

Para que  $R$  ocorra, é necessário que as  $a$  pessoas que preferem  $A$  recebam esse sabor, bem como as  $b$  pessoas que preferem  $B$ . Dessa forma, temos que distribuir os  $2n - (a + b)$  sorvetes restantes para as pessoas que não tem preferência. Assim, primeiramente temos os  $n - a$  sorvetes do sabor  $A$  que não foram alocados, de forma que:

$$\binom{2n-a-b}{n-a} = \frac{(2n-a-b)!}{(2n-a-b-n+a)!(n-a)!} = \frac{(2n-a-b)!}{(n-b)!(n-a)!} \quad (8)$$

E podemos mostrar que, caso fossemos alocar os  $n - b$  sorvetes do sabor  $B$  para as  $2n - (a + b)$  pessoas sem preferência, teríamos:

$$\binom{2n-a-b}{n-b} = \frac{(2n-a-b)!}{(2n-a-b-n+b)!(n-b)!} = \frac{(2n-a-b)!}{(n-a)!(n-b)!} \quad (9)$$

Como (8) e (9) são iguais, podemos ver que a alocação dos sorvetes restantes não depende de qual sabor já foi alocado. Assim, temos que  $|R| = \binom{2n-a-b}{n-a} = \binom{2n-a-b}{n-b}$ , portanto:

$$P(R) = \frac{|R|}{|\Omega|} = \frac{\binom{2n-a-b}{n-a}}{\binom{2n}{n}}$$

$\square$

**Exercise 2.7** (BJ10). Suponhamos que dez cartas estejam numeradas de 1 até 10. Das dez cartas, retira-se uma de cada vez, ao acaso e sem reposição, até retirar-se o primeiro número par. Conta-se o número de retiradas necessárias. Exiba um bom modelo probabilístico para esse experimento.

*Proof.* Dada essa formulação, temos que 5 cartas são pares e 5 são ímpares. Assim, considere o evento  $\{Y_k : 1 \leq k \leq 6; k \in \mathbb{Z}\}$  em que  $k$  indica que a  $k$ -ésima retirada contém a primeira carta par. Assim, por exemplo,  $Y_1$  indica o evento em que a primeira carta retirada é par,  $Y_2$  o evento em que a segunda carta retirada é par, e assim por diante.

O nosso espaço amostral é (visto que o número da carta não importa, apenas se é  $P = \text{"par"}$  ou  $I = \text{"ímpar"}$ ):

$$\Omega = \{(P), (I, P), (I, I, P), (I, I, I, P), (I, I, I, I, P), (I, I, I, I, I, P)\}$$

É fácil ver que não é possível ter  $\{Y_k : k \geq 7\}$ , já que as cartas são retiradas sem reposição. Podemos facilmente calcular as probabilidades de cada evento em  $\Omega$ , como segue:

$$\begin{aligned} P(Y_1) &= \frac{5}{10} = \frac{1}{2} \\ P(Y_2) &= \frac{5}{10} \cdot \frac{5}{9} = \frac{5}{18} \\ P(Y_3) &= \frac{5}{10} \cdot \frac{4}{9} \cdot \frac{5}{8} = \frac{5}{36} \\ P(Y_4) &= \frac{5}{10} \cdot \frac{4}{9} \cdot \frac{3}{8} \cdot \frac{5}{7} = \frac{5}{84} \\ P(Y_5) &= \frac{5}{10} \cdot \frac{4}{9} \cdot \frac{3}{8} \cdot \frac{2}{7} \cdot \frac{5}{6} = \frac{5}{252} \\ P(Y_6) &= \frac{5}{10} \cdot \frac{4}{9} \cdot \frac{3}{8} \cdot \frac{2}{7} \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{5}{5} = \frac{1}{252} \end{aligned}$$

Podemos ver que  $\sum_{k=1}^6 P(Y_k) = 1$ , e além disso, podemos denotar as probabilidades a partir da seguinte função:

$$P(Y_k) = \frac{5}{11-k} \cdot \prod_{n=1}^{k-1} \frac{6-n}{11-n} \quad (10)$$

A segunda parcela da equação (10) é válida para  $k \geq 2$ , pois ela representa as  $k-1$  cartas ímpares retiradas antes da primeira carta par, caso que só ocorre caso  $k \geq 2$ .  $\square$

**Exercise 2.8** (BJ11). Para cada um dos seguintes experimentos, descreva um espaço de probabilidade que sirva de modelo:

- a) Seleciona-se um ponto, ao acaso, do quadrado unitário

$$\{(x, y) : 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$$

*Proof.* Temos que:

$$\Omega = \{(x, y) \in [0, 1] \times [0, 1] \subset \mathbb{R}^2\}$$

Pela continuidade no vazio, é necessário que a probabilidade de ocorrência de um determinado ponto ser igual a zero, de modo que uma medida de probabilidade possível é por meio de intervalos. Considerando que  $x \sim U(0, 1)$  e  $y \sim U(0, 1)$  (ou seja,  $x$  e  $y$  são uniformemente distribuídos), podemos encontrar a probabilidade de  $(x, y) \in \mathbb{I}$ , com  $\mathbb{I}$  sendo um intervalo no cartesiano  $[0, 1] \times [0, 1] \in \mathbb{R}^2$ , por meio da distribuição de probabilidade conjunta de  $x$  e  $y$ .  $\square$



- b) Retiram-se cartas sucessivamente de um baralho de 52 cartas, ao acaso e *com* reposição, até retirar-se o primeiro rei. Registra-se o número total de retiradas.

*Proof.* Considere que  $\{Y : Y \in \{1, 2, \dots\}\}$  indica a quantidade de retiradas necessárias até o primeiro rei. O espaço amostral é dado diretamente:  $\Omega = \{1, 2, 3, \dots\}$ . Temos que, para cada retirada, a probabilidade da carta ser um rei é  $4/52 = 1/13$  (considerando que temos 4 reis no baralho), e a probabilidade de não ser é de  $48/52 = 12/13$ . Assim, a probabilidade de que a primeira retirada seja um rei é de:

$$P(Y = 1) = \frac{1}{13}$$

Caso isso não ocorra, a probabilidade de que o primeiro rei ocorra na segunda retirada é de:

$$P(Y = 2) = \frac{12}{13} \cdot \frac{1}{13}$$

É possível verificar que, para todo  $n \in \mathcal{N}$  a probabilidade de que o primeiro rei ocorra na retirada  $n$  é de:

$$P(Y = n) = \left(\frac{12}{13}\right)^{n-1} \cdot \left(\frac{1}{13}\right)$$

Esse modelo de probabilidade é denotado modelo geométrico. □

- c) Quinze bolas são retiradas, ao acaso e *com* reposição, de uma urna contendo 5 bolas vermelhas, 9 bolas pretas e uma bola branca. Observa-se o número que ocorre cada cor.

*Proof.* Sejam os eventos  $V, P$  e  $B$  o número de vezes que as retiradas foram de bolas vermelhas, pretas e brancas, respectivamente. É necessário (pela definição do modelo) que  $V + P + B = 15$ , mas consideremos o caso em que o número de retiradas seja  $n$ . Assim, para  $n = 1$ , o espaço amostral  $\Omega$  é:

$$\Omega = \{(V), (P), (B)\}$$

E as probabilidades de cada evento são:

$$\begin{aligned} P(V = 1) &= \frac{5}{15} \\ P(P = 1) &= \frac{9}{15} \\ P(B = 1) &= \frac{1}{15} \end{aligned}$$

Para  $n = 2$  bolas retiradas, temos que o espaço amostral é:

$$\begin{aligned} \Omega = \{ &(V, V), (V, P), (V, B), \\ &(P, V), (P, P), (P, B), \\ &(B, V), (B, P), (B, B)\} \end{aligned}$$

E as probabilidades de cada evento são:

$$\begin{aligned} P(V, V) &= \frac{5}{15} \cdot \frac{5}{15}; P(V, P) = \frac{5}{15} \cdot \frac{9}{15}; P(V, B) = \frac{5}{15} \cdot \frac{1}{15}; \\ P(P, V) &= \frac{9}{15} \cdot \frac{5}{15}; P(P, P) = \frac{9}{15} \cdot \frac{9}{15}; P(P, B) = \frac{9}{15} \cdot \frac{1}{15}; \\ P(B, V) &= \frac{1}{15} \cdot \frac{5}{15}; P(B, P) = \frac{1}{15} \cdot \frac{9}{15}; P(B, B) = \frac{1}{15} \cdot \frac{1}{15} \end{aligned}$$

Aqui é possível ver o padrão que surge para esse problema. Temos que os eventos  $V, P, B$  formam uma permutação (com repetição) da quantidade de bolas retiradas. A fórmula para a permutação com repetição de  $n$  elementos, em que cada um aparece  $k_1, k_2, \dots, k_j$  vezes é dada por:

$$P_n^{k_1, k_2, \dots, k_j} = \frac{n!}{k_1! \cdot k_2! \cdot \dots \cdot k_j!}$$

Assim, podemos considerar que cada evento irá aparecer uma quantidade  $V = v, P = p, B = b$  de vezes, com a seguinte probabilidade:

$$P(V = v, P = p, B = b) = \frac{15!}{v!p!b!} \cdot \left(\frac{5}{15}\right)^v \cdot \left(\frac{9}{15}\right)^p \cdot \left(\frac{1}{15}\right)^b; \text{ com } v + p + b = 15$$

Caso seja necessário, podemos ainda generalizar para uma quantidade  $n : 1 \leq n \leq 15$  de retiradas:

$$P(V = v, P = p, B = b) = \frac{n!}{v!p!b!} \cdot \left(\frac{5}{15}\right)^v \cdot \left(\frac{9}{15}\right)^p \cdot \left(\frac{1}{15}\right)^b; \text{ com } v + p + b = n$$

Em que verifica-se facilmente que é válido para os casos em que  $n = 1$  e  $n = 2$  demonstrados anteriormente.  $\square$

d) O experimento (c) é realizado *sem* reposição.

*Proof.* Como temos 15 bolas que serão retiradas *sem* reposição, o único evento possível após as 15 serem retiradas é:

$$\Omega = \{(V = 5, P = 9, B = 1)\}$$

E a probabilidade de isso ocorrer é 1 (visto que é o único evento no espaço amostral). Caso consideremos uma quantidade de retiradas  $n < 15$ , temos que o modelo de probabilidade é diferente. Consideremos que  $V + P + B = n$  e que a quantidade de vezes que cada cor aparece é  $v, p$  e  $b$ , respectivamente. Então, como a ordem com que as cores são retiradas não importa, a probabilidade de aparecer uma quantidade de bolas de cada cor é dada por:

$$P(V = v, P = p, B = b) = \frac{\binom{5}{v} \binom{9}{p} \binom{1}{b}}{\binom{15}{n}}, \quad v + p + b = n$$

Esse modelo de probabilidade é chamado de multinomial hipergeométrico, e é uma generalização do modelo hipergeométrico para mais de duas classes (como é o caso).  $\square$

**Exercise 2.9** (BJ12). Retiram-se 4 cartas, ao acaso, de um baralho de 52 cartas. Registra-se o número de reis na amostra. Exiba um bom modelo probabilístico para este experimento se:

a) As retiradas são feitas *sem* reposição.

*Proof.* Considerando que em um baralho usual tem 52 cartas, e que a ordem com que cada uma das 4 cartas retiradas da amostra não importa (apenas importa a quantidade de reis na amostra), a quantidade total de amostras possíveis é  $\binom{52}{4}$ .

Como temos 4 reis no baralho, isso implica que há 48 cartas que são “não-reis”. Dessa forma, se na amostra forem coletados  $k$  reis, serão coletados também  $4 - k$  “não-reis”, com os  $k$  reis podendo aparecer de  $\binom{4}{k}$  maneiras diferentes (não importa qual o rei foi registrado) e os  $4 - k$  “não-reis” podem aparecer de  $\binom{48}{4-k}$  maneiras diferentes.

Assim, seja  $K$  o evento registrar  $k$  reis na amostra, a probabilidade  $P(K = k)$  é dada por:

$$P(K = k) = \frac{\binom{4}{k} \binom{48}{4-k}}{\binom{52}{4}} \quad (11)$$

Esse modelo é chamado de hipergeométrico, que vale quando sabemos a quantidades de sucessos totais na população, e queremos contar a quantidade de sucessos coletados em uma amostra finita da população (que também deve ser finita).  $\square$

b) As retiradas são feitas *com* reposição.

*Proof.* Se as retiradas são feitas com reposição, a probabilidade de registrar um rei em cada retirada é de  $4/52$  e a probabilidade de registrar um “não-rei” é de  $48/52$ . Como a ordem das retiradas não importa, podemos ver que em uma amostra de tamanho 4, os  $k$  reis podem aparecer de  $\binom{4}{k}$  maneiras diferentes. Além disso, podemos ver que, como irão aparecer  $k$  reis na amostra, consequentemente irão aparecer  $4 - k$  “não-reis”.

Assim, seja  $K$  o evento registrar  $k$  reis na amostra, a probabilidade  $P(K = k)$  é dada por:

$$P(K = k) = \binom{4}{k} \left(\frac{4}{52}\right)^k \left(\frac{48}{52}\right)^{4-k} \quad (12)$$

Esse modelo é chamado de binomial, e vale quando queremos encontrar a probabilidade de ocorrer  $k$  sucessos em uma amostra de tamanho  $n$ , dado que a probabilidade de cada sucesso é fixa.  $\square$

c) Determine em que caso, (a) ou (b), é mais provável obter 4 reis.

*Proof.* Substituindo os valores de  $k$  em (11) e (12) para 4, podemos calcular as probabilidades em cada caso. Assim:

$$P(K = k) = \frac{\binom{4}{4} \binom{48}{0}}{\binom{52}{4}} \approx 3.7 \times 10^{-6}$$

$$P(K = k) = \binom{4}{4} \left(\frac{4}{52}\right)^4 \left(\frac{48}{52}\right)^0 \approx 3.5 \times 10^{-5}$$

De modo que é possível ver que no caso com reposição a probabilidade de encontrar 4 reis é maior.  $\square$

**Exercise 2.10** (BJ13).

a) Sejam  $A, B$  e  $C$  eventos aleatórios em um espaço de probabilidade  $(\Omega, \mathcal{A}, P)$ . Mostre que

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$$

e

$$P(A \cup B \cup C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A \cap B) - P(A \cap C) - P(B \cap C) + P(A \cap B \cap C)$$

*Proof.* Podemos escrever os eventos  $A$  e  $B$  como as seguintes uniões de eventos disjuntos:

$$A = (A \cap B) \cup (A \cap B^c)$$

$$B = (A \cap B) \cup (A^c \cap B)$$

Utilizando a propriedade da aditividade finita (P3), temos que:

$$\begin{aligned} P(A) &= P(A \cap B) + P(A \cap B^c) \Rightarrow P(A \cap B^c) = P(A) - P(A \cap B) \\ P(B) &= P(A \cap B) + P(A^c \cap B) \Rightarrow P(A^c \cap B) = P(B) - P(A \cap B) \end{aligned} \quad (13)$$

Além disso, podemos escrever o evento  $(A \cup B)$  como a seguinte união disjunta de eventos:

$$(A \cup B) = (A \cap B^c) \cup (A^c \cap B) \cup (A \cap B)$$

Por fim, utilizando os resultados de (13) e a aditividade finita, temos que:

$$\begin{aligned}
P(A \cup B) &= P(A \cap B^c) + P(A^c \cap B) + P(A \cap B) \\
&= P(A) - P(A \cap B) + P(B) - P(A \cap B) + P(A \cap B) \\
&= P(A) + P(B) - P(A \cap B)
\end{aligned}$$

Para a segunda expressão, podemos levar em consideração que os conjuntos  $A, B$  e  $C$  podem ser escritos como uniões de eventos disjuntos da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
A &= (A \cap B^c \cap C^c) \cup (A \cap B \cap C^c) \cup (A \cap B^c \cap C) \cup (A \cap B \cap C) \\
B &= (A^c \cap B \cap C^c) \cup (A \cap B \cap C^c) \cup (A^c \cap B \cap C) \cup (A \cap B \cap C) \\
C &= (A^c \cap B^c \cap C) \cup (A^c \cap B \cap C) \cup (A \cap B^c \cap C) \cup (A \cap B \cap C)
\end{aligned}$$

Nos utilizando novamente da aditividade finita, temos que:

$$\begin{aligned}
P(A) &= P(A \cap B^c \cap C^c) + P(A \cap B \cap C^c) + P(A \cap B^c \cap C) + P(A \cap B \cap C) \\
P(B) &= P(A^c \cap B \cap C^c) + P(A \cap B \cap C^c) + P(A^c \cap B \cap C) + P(A \cap B \cap C) \\
P(C) &= P(A^c \cap B^c \cap C) + P(A^c \cap B \cap C) + P(A \cap B^c \cap C) + P(A \cap B \cap C)
\end{aligned}$$

De maneira similar ao que fizemos na demonstração anterior, podemos isolar as probabilidades à direita, como por exemplo:

$$P(A \cap B \cap C^c) = P(A) - P(A \cap B^c \cap C^c) - P(A \cap B^c \cap C) - P(A \cap B \cap C) \quad (14)$$

Mas vale notar que, por serem eventos disjuntos:

$$P(A \cap B^c \cap C^c) + P(A \cap B^c \cap C) = P(A - B) = P(A \cap B^c) = P(A) - P(A \cap B)$$

De modo que a equação (14) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}
P(A \cap B \cap C^c) &= P(A) - P(A) + P(A \cap B) - P(A \cap B \cap C) \\
&= P(A \cap B) - P(A \cap B \cap C)
\end{aligned}$$

Assim, podemos denotar as seguintes probabilidades:

$$\begin{aligned}
P(A \cap B \cap C^c) &= P(A \cap B) - P(A \cap B \cap C) \\
P(A \cap B^c \cap C) &= P(A \cap C) - P(A \cap B \cap C) \\
P(A^c \cap B \cap C) &= P(B \cap C) - P(A \cap B \cap C)
\end{aligned} \quad (15)$$

Utilizando os resultados de (15), podemos isolar as outras probabilidades, tais como:

$$\begin{aligned}
P(A \cap B^c \cap C^c) &= P(A) - P(A \cap B \cap C^c) - P(A \cap B^c \cap C) - P(A \cap B \cap C) \\
&= P(A) - P(A \cap B) + P(A \cap B \cap C) - P(A \cap C) + P(A \cap B \cap C) - P(A \cap B \cap C) \\
&= P(A) - P(A \cap B) - P(A \cap C) + P(A \cap B \cap C)
\end{aligned}$$

De modo que podemos denotar as seguintes probabilidades:

$$\begin{aligned}
P(A \cap B^c \cap C^c) &= P(A) - P(A \cap B) - P(A \cap C) + P(A \cap B \cap C) \\
P(A^c \cap B \cap C^c) &= P(B) - P(A \cap B) - P(B \cap C) + P(A \cap B \cap C) \\
P(A^c \cap B^c \cap C) &= P(C) - P(A \cap C) - P(B \cap C) + P(A \cap B \cap C)
\end{aligned} \quad (16)$$

O evento  $(A \cup B \cup C)$  pode ser escrito como a seguinte união de eventos disjuntos (de fácil verificação que são disjuntos dois a dois):

$$\begin{aligned} (A \cup B \cup C) = & (A \cap B \cap C^c) \cup (A \cap B^c \cap C) \cup (A^c \cap B \cap C) \cup \\ & (A \cap B^c \cap C^c) \cup (A^c \cap B \cap C^c) \cup (A^c \cap B^c \cap C) \cup \\ & (A \cap B \cap C) \end{aligned} \quad (17)$$

Por fim, valendo-se da aditividade finita e substituindo em (17) os resultados obtidos em (15) e (16), temos que:

$$\begin{aligned} P(A \cup B \cup C) = & P(A \cap B \cap C^c) + P(A \cap B^c \cap C) + P(A^c \cap B \cap C) + P(A \cap B^c \cap C^c) + \\ & P(A^c \cap B \cap C^c) + P(A^c \cap B^c \cap C) + P(A \cap B \cap C) \\ = & P(A \cap B) - P(A \cap B \cap C) + P(A \cap C) - P(A \cap B \cap C) + P(B \cap C) - P(A \cap B \cap C) + \\ & P(A) - P(A \cap B) - P(A \cap C) + P(B) - P(A \cap B) - P(B \cap C) + P(C) - P(A \cap C) - \\ & P(B \cap C) + P(A \cap B \cap C) \\ = & P(A) + P(B) + P(C) - P(A \cap B) - P(A \cap C) - P(B \cap C) + P(A \cap B \cap C) \end{aligned}$$

□

b) Enuncie a generalização do item **(a)** para o caso da união de  $n$  eventos aleatórios.

*Proof.* Podemos ver que as demonstrações anteriores podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = & \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P(A_{i_1} \cap A_{i_2}) + \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < i_3 \leq n} P(A_{i_1} \cap A_{i_2} \cap A_{i_3}) - \dots \\ & + (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k}) \end{aligned} \quad (18)$$

Esse é chamado de princípio de inclusão-exclusão.

□

c) Prove as seguintes *desigualdades de Bonferroni*:

$$(i) \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} P(A_i \cap A_j) \leq P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) \leq \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} P(A_i \cap A_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} P(A_i \cap A_j \cap A_k)$$

*Proof.* Podemos demonstrar a primeira desigualdade utilizando a equação (18):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} P(A_i \cap A_j) & \leq P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) \\ 0 & \leq P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} P(A_i \cap A_j)\right) \\ 0 & \leq \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} P(A_i \cap A_j \cap A_k) - \sum_{1 \leq i < j < k < l \leq n} P(A_i \cap A_j \cap A_k \cap A_l) + \dots \\ & + (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k}) \end{aligned} \quad (19)$$

E como  $(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_n}) \subseteq (A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_{n-1}}) \Rightarrow P((A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_n})) \leq P((A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_{n-1}}))$ , temos que a expressão (19) é maior que 0. Para a segunda desigualdade, vamos nos valer do mesmo princípio:

$$\begin{aligned}
P\left(\bigcup_{i=1}^n A_n\right) &\leq \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} P(A_i \cap A_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} P(A_i \cap A_j \cap A_k) \\
&\leq \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} P(A_i \cap A_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} P(A_i \cap A_j \cap A_k) - \left(P\left(\bigcup_{i=1}^n A_n\right)\right) \quad (20) \\
&\leq \sum_{1 \leq i < j < k < l \leq n} P(A_i \cap A_j \cap A_k \cap A_l) - \dots - (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k})
\end{aligned}$$

E da mesma forma que antes, é possível ver que a última expressão em (20) é maior que 0.  $\square$

(ii) Se  $k$  é ímpar,  $k \leq n$ , então:

$$\begin{aligned}
P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) &\leq \sum_{i=1}^n P(A_n) - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P(A_{i_1} \cap A_{i_2}) + \dots \\
&\quad + (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k});
\end{aligned}$$

se  $k$  é par,  $k \leq n$ , vale  $\geq$  nesta última desigualdade.

*Proof.* Como  $k \leq n$ , podemos separar a desigualdade em dois casos:

1.  $k = n$ ;
2.  $k < n$ ;

No primeiro caso é fácil ver que a expressão se iguala à generalização para a união dada em (18). Para o segundo caso, temos que:

$$\begin{aligned}
P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) &= \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P(A_{i_1} \cap A_{i_2}) + \dots \\
&\quad + (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_{k-1} < i_k} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k}) + (-1)^k \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k < i_{k+1}} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_{k+1}}) + \dots
\end{aligned}$$

$\uparrow$   
Termo k

$\uparrow$   
Termo k+1

Como  $k$  é ímpar, o termo  $k$  será positivo e o termo  $k+1$  será negativo. Assim, se subtrairmos os  $k+j$ ,  $j \in \{1, \dots, n-k\}$  termos de ambos os lados, teremos:

$$\begin{aligned}
P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) - \left((-1)^k \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k < i_{k+1}} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_{k+1}}) + \dots\right) &= \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P(A_{i_1} \cap A_{i_2}) + \dots \\
&\quad + (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_{k-1} < i_k} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k})
\end{aligned}$$

E podemos ver que:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) - \left((-1)^k \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k < i_{k+1}} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_{k+1}}) + \dots\right) \geq P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right)$$

De modo que:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) \leq \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P(A_{i_1} \cap A_{i_2}) + \dots \\ + (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_{k-1} < i_k} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k})$$

Se  $k$  for par, o termo  $k$  será negativo e o termo  $k+1$  será positivo, de modo que a desigualdade anterior se inverte, ao fazer a subtração dos  $k+j$ ,  $j \in \{1, \dots, n-k\}$  termos na igualdade.  $\square$

**Exercise 2.11** (BJ15). Suponha que  $n$  cartas numeradas de 1 até  $n$  sejam embaralhadas e retiradas uma por uma, sem reposição, até todas as cartas serem retiradas. Qual a probabilidade de que para pelo menos uma carta, o número da carta coincida com o número da retirada?

*Proof.* Seja  $A_i$  o evento em que o número da carta  $i$  coincidiu com o número da retirada. Podemos ver que, o caso em que para pelo menos uma delas coincida é equivalente a  $\bigcup_{i=1}^n A_i$ . Dessa maneira, podemos ver que a probabilidade de isso ocorrer é:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P(A_{i_1} \cap A_{i_2}) + \dots \\ + (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k});$$

O primeiro termo pode ser demonstrado como sendo:

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} = 1$$

Para o termo de intercessão dois a dois, temos que a probabilidade de que o número na primeira carta ser igual a o número da retirada é de  $1/n$ , e o da segunda carta o ser é de  $1/(n-1)$ , e como temos  $\binom{n}{2}$  combinações diferentes de retiradas, temos que a probabilidade do segundo termo é:

$$\sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} P(A_{i_1} \cap A_{i_2}) = P(A_1 \cap A_2) + P(A_1 \cap A_3) + \dots + P(A_{n-1} \cap A_n) \\ = \frac{\binom{n}{2}}{n \cdot (n-1)} = \frac{n!}{(n-2)!2!} \cdot \frac{1}{n \cdot (n-1)} = \frac{n!}{n!2!} = \frac{1}{2!}$$

Assim, podemos ver que para qualquer termo teremos:

$$\sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} P(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k}) = \frac{1}{k!}$$

De modo que a probabilidade da união dos eventos se resume à série:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = \frac{1}{1!} - \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} - \dots + (-1)^{k-1} \frac{1}{k!}$$

$\square$

**Exercise 2.12** (BJ16). Seja  $(\Omega, \mathcal{A}, P)$  um espaço de probabilidade e suponha que todos os conjuntos abaixo pertençam a  $\mathcal{A}$ . Prove:

- a) Se os  $A_n$  são disjuntos e  $P(B|A_n) \geq c$  para todo  $n$ , então  $P(B|\bigcup_{n=1}^k A_n) \geq c$  (pode supor  $P(A_n) > 0$  para todo  $n$ ).

*Proof.* Sabemos que  $A_i \cap A_j = \emptyset$ ,  $\forall i, j$ . Dito isso, podemos ver que a seguinte relação é válida:

$$P(B|A_n) = \frac{P(A_n \cap B)}{P(A_n)} \geq c$$

$$P(A_n \cap B) \geq cP(A_n) \quad (21)$$

Além disso, podemos desenvolver  $P(B|\bigcup_{n=1}^k A_n)$  da seguinte forma:

$$\begin{aligned} P\left(B \mid \bigcup_{n=1}^k A_n\right) &= \frac{P(B \cap (A_1 \cup A_2 \cdots \cup A_k))}{P\left(\bigcup_{n=1}^k A_n\right)} \\ &= \frac{P((A_1 \cap B) \cup (A_2 \cap B) \cup \cdots \cup (A_k \cap B))}{\sum_{n=1}^k P(A_n)} \\ P\left(B \mid \bigcup_{n=1}^k A_n\right) &= \frac{\sum_{n=1}^k P(A_n \cap B)}{\sum_{n=1}^k P(A_n)} \end{aligned} \quad (22)$$

O denominador de (22) é simplesmente o somatório das probabilidades dos  $A_n$ 's pelo fato de que eles são disjuntos (definidos no enunciado da questão). Agora, considerando que a relação (21) é válida para todos os  $A_n$ 's, vamos somar todas as probabilidades para os  $n \in \{1, 2, \dots, k\}$ :

$$\begin{aligned} P(A_1 \cap B) + P(A_2 \cap B) + \cdots + P(A_k \cap B) &\geq cP(A_1) + cP(A_2) + \cdots + cP(A_k) \\ \sum_{n=1}^k P(A_n \cap B) &\geq \sum_{n=1}^k cP(A_n) \\ \sum_{n=1}^k P(A_n \cap B) &\geq c \sum_{n=1}^k P(A_n) \\ \frac{\sum_{n=1}^k P(A_n \cap B)}{\sum_{n=1}^k P(A_n)} &\geq c \\ P\left(B \mid \bigcup_{n=1}^k A_n\right) &\geq c \end{aligned}$$

□

- b) O item (a) com “=” no lugar de “ $\geq$ ”.

*Proof.* Substituindo o sinal de  $\geq$  em (22) por uma igualdade, a prova é igual ao já realizado no item anterior. □

- c) Se  $A_n \supset A_{n+1}$  e  $P(A_{n+1}|A_n) \leq \frac{1}{2}$  para todo  $n$ , então  $P(A_n) \rightarrow 0$  quando  $n \rightarrow \infty$ .

*Proof.* Consideremos o caso inicial, com  $A_1$  e  $A_2$ . Disso tem-se que:



$$P(A_2|A_1) = \frac{P(A_1 \cap A_2)}{P(A_1)} \leq \frac{1}{2}$$

Como  $A_1 \supset A_2$ ,  $P(A_1 \cap A_2) = P(A_2)$ . Logo:

$$\frac{P(A_2)}{P(A_1)} \leq \frac{1}{2} \Rightarrow P(A_2) \leq \frac{1}{2}P(A_1)$$

Para o caso seguinte, com  $A_2$  e  $A_3$ , temos que:

$$P(A_3|A_2) = \frac{P(A_2 \cap A_3)}{P(A_2)} \leq \frac{1}{2}$$

$$\frac{P(A_3)}{P(A_2)} \leq \frac{1}{2} \Rightarrow P(A_3) \leq \frac{1}{2}P(A_2)$$

E como  $P(A_2) \leq \frac{1}{2}P(A_1)$ , temos que  $P(A_3) \leq \frac{1}{4}P(A_1)$ . Assim, já é possível identificar que, para qualquer  $n$  temos que:

$$P(A_n) \leq \frac{1}{2^{n-1}}P(A_1)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(A_n) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^{n-1}}P(A_1) = 0$$

Assim, independentemente do valor de  $P(A_1)$ , o valor  $P(A_n) \rightarrow 0$  conforme  $n \rightarrow \infty$ . □

d) Se os  $A_n$  são disjuntos e  $P(B|A_n) = P(C|A_n)$  para todo  $n$ , então

$$P(B \cup A_n) = P(C \cup A_n)$$

*Proof.* Como os  $A_n$ s são disjuntos, temos que:

$$P(B|A_n) = \frac{P(B \cap (\cup A_n))}{P(\cup A_n)}$$

$$= \frac{P((A_1 \cap B) \cup (A_2 \cap B) \cup \dots \cup (A_n \cap B))}{\sum P(A_n)}$$

$$= \frac{\sum P(A_n \cap B)}{\sum P(A_n)}$$

Para  $C$  temos a mesma relação:

$$P(C|A_n) = \frac{\sum P(A_n \cap C)}{\sum P(A_n)}$$

E disso temos que:

$$P(B|A_n) = \frac{P(A_n \cap B)}{P(A_n)}$$

Como, por hipótese, temos que  $P(B|A_n) = P(C|A_n) \Rightarrow P(A_n \cap B) = P(A_n \cap C)$ , de modo que, como os  $A_n$ s são disjuntos,  $\sum P(A_n \cap B) = \sum P(A_n \cap C)$ , logo:

$$\frac{\sum P(A_n \cap B)}{\sum P(A_n)} = \frac{\sum P(A_n \cap C)}{\sum P(A_n)}$$

□

e) Se  $A_1, A_2, \dots$  são disjuntos e  $\cup A_n = \Omega$ , então:

$$P(B|C) = \sum_n P(A_n|C)P(B|A_n \cap C)$$

*Proof.* Pelo Teorema da Multiplicação, temos que  $P(A_n \cap B \cap C)$  pode ser escrito como:

$$P(A_n \cap B \cap C) = P(B|A_n \cap C)P(A_n \cap C)P(C)$$

É importante notar que essa representação não é única, mas apenas conveniente para o problema em questão. Podemos então somar para todos os  $A_n$ s:

$$\sum P(A_n \cap B \cap C) = \sum P(B|A_n \cap C)P(A_n \cap C)P(C) = P(C) \sum P(B|A_n \cap C)P(A_n \cap C)$$

Como os  $A_n$ s formam uma partição de  $\Omega$ ,  $\sum P(A_n \cap B \cap C) = P(B \cap C)$ . Logo:

$$\begin{aligned} P(B|C) &= \frac{P(B \cap C)}{P(C)} \\ &= \frac{P(C) \sum P(B|A_n \cap C)P(A_n \cap C)}{P(C)} \\ &= \sum P(B|A_n \cap C)P(A_n \cap C) \end{aligned}$$

□

**Exercise 2.13** (BJ17). Suponha que a ocorrência ou não de chuva dependa das condições do tempo no dia imediatamente anterior. Admita-se que se chove hoje, choverá amanhã com probabilidade de 0,7 e que se não chove hoje choverá amanhã com probabilidade 0,4. Sabendo-se que choveu hoje, calcule a probabilidade de que choverá depois de amanhã.

*Proof.* Sejam os eventos  $C_n$  = “Choveu no dia de hoje”,  $NC_n$  = “Não choveu no dia de hoje”. De maneira similar,  $C_{n+1}$  indica que choverá amanhã,  $C_{n+2}$  que choverá depois de amanhã e assim por diante. Sabemos pelo enunciado as seguintes probabilidades:

$$\begin{aligned} P(C_{n+1}|C_n) &= 0,7, \quad P(NC_{n+1}|C_n) = 0,3 \\ P(C_{n+1}|NC_n) &= 0,4, \quad P(NC_{n+1}|NC_n) = 0,6 \end{aligned}$$

Além disso, como os eventos Chover e Não-Chover formam uma partição (são eventos complementares), pelo Teorema da Probabilidade Total temos que a probabilidade de chover depois de amanhã é dada por:

$$P(C_{n+2}) = P(C_{n+2}|C_{n+1})P(C_{n+1}) + P(C_{n+2}|NC_{n+1})P(NC_{n+1}) \quad (23)$$

É fácil perceber que  $P(C_{n+2}|C_{n+1}) = P(C_{n+1}|C_n)$  e de maneira similar que  $P(C_{n+2}|NC_{n+1}) = P(C_{n+1}|NC_n)$ . Ainda assim, é necessário encontrar as probabilidades  $P(C_{n+1})$  e  $P(NC_{n+1})$ . Como sabemos que choveu hoje,  $P(C_n) = 1$  e  $P(NC_n) = 0$ , de modo que:

$$\begin{aligned} P(C_{n+1}) &= P(C_{n+1}|C_n)P(C_n) + P(C_{n+1}|NC_n)P(NC_n) \\ &= 0,7 \times 1 + 0,4 \times 0 = 0,7 \\ P(NC_{n+1}) &= P(NC_{n+1}|C_n)P(C_n) + P(NC_{n+1}|NC_n)P(NC_n) \\ &= 0,3 \times 1 + 0,6 \times 0 = 0,3 \end{aligned}$$

Substituindo esses valores em (23), temos:

$$\begin{aligned}
P(C_{n+2}) &= P(C_{n+1}|C_n) \times 0,7 + P(C_{n+1}|NC_n) \times 0,3 \\
&= 0,7 \times 0,7 + 0,4 \times 0,3 = 0,49 + 0,12 = 0,61
\end{aligned}$$

□

**Exercise 2.14** (BJ18). Certo experimento consiste em lançar um dado equilibrado duas vezes, independentemente. Dado que os dois números sejam diferentes, qual a probabilidade condicional de:

a) Pelo menos um dos números ser 6?

*Proof.* Sejam  $A_1$  e  $A_2$  os lançamentos do primeiro e do segundo dado, respectivamente. Sabemos que  $P(A_1 = A_2) = 0$ . Disso temos que:

$$\begin{aligned}
P((A_1 = 6) \cup (A_2 = 6)) &= P(A_1 = 6) + P(A_2 = 6) - P((A_1 = 6) \cap (A_2 = 6)) \\
&= \frac{1}{6} + \frac{1}{6} - 0 \\
&= \frac{1}{3}
\end{aligned}$$

□

b) A soma dos números ser 8?

*Proof.* Considere o evento  $S = x, x \in \{2, 3, \dots, 12\}$  o resultado da soma dos lançamentos  $A_1$  e  $A_2$ . Utilizando o Teorema da Probabilidade Total, podemos decompor a probabilidade da soma ser igual a 8 da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
P(S = 8) &= P(S = 8|A_1 = 1)P(A_1 = 1) + P(S = 8|A_1 = 2)P(A_1 = 2) + \dots + P(S = 8|A_1 = 6)P(A_1 = 6) \\
&= 0 \times \frac{1}{6} + \frac{1}{5} \times \frac{1}{6} + \frac{1}{5} \times \frac{1}{6} + 0 \times \frac{1}{6} + \frac{1}{5} \times \frac{1}{6} + \frac{1}{5} \times \frac{1}{6} \\
&= \frac{1}{30} + \frac{1}{30} + \frac{1}{30} + \frac{1}{30} \\
&= \frac{4}{30}
\end{aligned}$$

□

**Exercise 2.15** (BJ19). Em teste de múltipla escolha, a probabilidade do aluno saber a resposta é  $p$ . Havendo  $m$  escolhas, se ele sabe a resposta ele responde corretamente com probabilidade 1; se não sabe, ele responde corretamente com probabilidade  $\frac{1}{m}$ . Qual a probabilidade de que ele soubesse a resposta dado que a pergunta foi respondida corretamente? Calcule o limite dessa probabilidade quando (i)  $m \rightarrow \infty$  com  $p$  fixo e (ii)  $p \rightarrow 0$  com  $m$  fixo.

*Proof.* Sejam:  $P(S) = p$  a probabilidade de saber a resposta,  $P(A|S) = 1$  a probabilidade de acertar, dado que sabia a resposta,  $P(A|NS) = \frac{1}{m}$  a probabilidade de acertar, dado que não sabia a resposta e  $P(NA|NS) = \frac{m-1}{m}$  a probabilidade de não acertar, dado que não sabe a resposta. Sabemos que os eventos  $S$  e  $NS$  são complementares, assim como  $A$  e  $NA$ . Queremos encontrar  $P(S|A)$ , que é dada por:

$$\begin{aligned}
P(S|A) &= \frac{P(S \cap A)}{P(A)} \\
&= \frac{P(A|S)P(S)}{P(A|S)P(S) + P(A|NS)P(NS)} \\
&= \frac{1 \times p}{1 \times p + \frac{1}{m} \times (1 - p)} \\
&= \frac{p}{\frac{mp+1-p}{m}}
\end{aligned}$$

De modo que, simplificando a última expressão:

$$P(S|A) = \frac{mp}{p(m-1)+1} \quad (24)$$

Agora, calculando os limites temos:

• (i)

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{mp}{p(m-1)+1} = \frac{0}{1} = 0$$

• (ii)

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{mp}{p(m-1)+1} \xrightarrow{\text{L'Hôpital}} \frac{\frac{\partial}{\partial m} mp}{\frac{\partial}{\partial m} p(m-1)+1} = \frac{p}{p} = 1$$

□

**Exercise 2.16** (BJ20). Durante o mês de novembro a probabilidade de chuva é de 0,3. O Fluminense ganha um jogo em um dia de chuva com a probabilidade de 0,4; em um dia sem chuva com a probabilidade 0,6. Se ganhou um jogo em novembro, qual é a probabilidade de que choveu neste dia?

*Proof.* Sejam os seguintes eventos:  $P(C) = 0,3$  é a probabilidade de chover em novembro,  $P(NC) = 0,7$  é a probabilidade de não chover em novembro,  $P(V|C) = 0,4$  é a probabilidade de vitória, dado que choveu no dia,  $P(D|C) = 0,6$  é a probabilidade de derrota, dado que choveu no dia,  $P(V|NC) = 0,6$  é a probabilidade de vitória, dado que não choveu no dia e  $P(D|NC) = 0,4$  é a probabilidade de derrota, dado que não choveu no dia. Pelo Teorema da Probabilidade Total, temos que:

$$\begin{aligned} P(V) &= P(V|C)P(C) + P(V|NC)P(NC) \\ &= 0,4 \times 0,3 + 0,6 \times 0,7 \\ &= 0,54 \end{aligned}$$

Além disso, temos que o evento  $P(C \cap V) = P(V|C)P(C)$ , logo:

$$P(C \cap V) = P(V|C)P(C) = 0,4 \times 0,3 = 0,12$$

Assim, temos que a probabilidade de ter chovido, dado que o Fluminense ganhou o jogo em novembro é de:

$$P(C|V) = \frac{P(C \cap V)}{P(V)} = \frac{0,12}{0,54} = \frac{2}{9}$$

□

### 3 Variáveis Aleatórias

#### 3.1 Variáveis aleatórias e funções de distribuição

**Example 3.1.** Considere um experimento em que uma moeda é lançada duas vezes. Seja  $X$  = total de caras nos dois lançamentos. Denotemos o evento cara como  $H$  e coroa como  $T$ . Logo:

Espaço Amostral ( $\Omega$ )	$X$
HT	1
TH	1
HH	2
TT	0

Logo,  $X : \mathcal{F} \rightarrow \mathbb{R}$ . Vale também que,  $\forall x$  valor na imagem de  $X$ ,  $X^{-1}(x) \in \mathcal{F}$ . Por exemplo:

$$x = 1 \Rightarrow X^{-1}(1) = \{HT, TH\}$$

$$x = 2 \Rightarrow X^{-1}(2) = \{HH\}$$

$$x = 0 \Rightarrow X^{-1}(0) = \{TT\}$$

**Definition 3.1** (Variável aleatória). Seja  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  um espaço de probabilidades. Uma função  $X : \mathcal{F} \rightarrow \mathbb{R}$  é variável aleatória se  $[x \in I] \in \mathcal{F}$ ,  $I \in \mathbb{R}$  (ou, equivalentemente, se  $\{\omega : X(\omega) \in I\} \in \mathcal{F}$ ;  $X^{-1}(I) \in \mathcal{F}$ ).

**Definition 3.2** (Distribuição Acumulada). Considere um espaço de probabilidades  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  e  $X : \mathcal{F} \rightarrow \mathbb{R}$  uma variável aleatória, defina  $F(r) = P(X \leq r) = P(\{\omega : X(\omega) \leq r\})$ .

**Example 3.2.** Seja  $X$  = número de caras em dois lançamentos de moeda (honesta). Temos que as probabilidades de  $X$  são dadas por:

$$P(X = 0) = P(\{TT\}) = \frac{1}{4}$$

$$P(X = 1) = P(\{TH, HT\}) = \frac{2}{4}$$

$$P(X = 2) = P(\{HH\}) = \frac{1}{4}$$

Para encontrarmos a função de distribuição acumulada, podemos particinar o espaço e “acumular” as probabilidades. Para  $r < 0$ :

$$F(r) = P([X \leq r]) = P(\emptyset) = 0$$

Para  $r \in [0, 1)$ :

$$F(r) = P([X \leq r]) = P(X \leq 0) = \frac{1}{4}$$

Para  $r \in [1, 2)$ :

$$F(r) = P([X \leq r]) = P(X \leq 1) = P(X = 0) + P(X = 1) = \frac{3}{4}$$

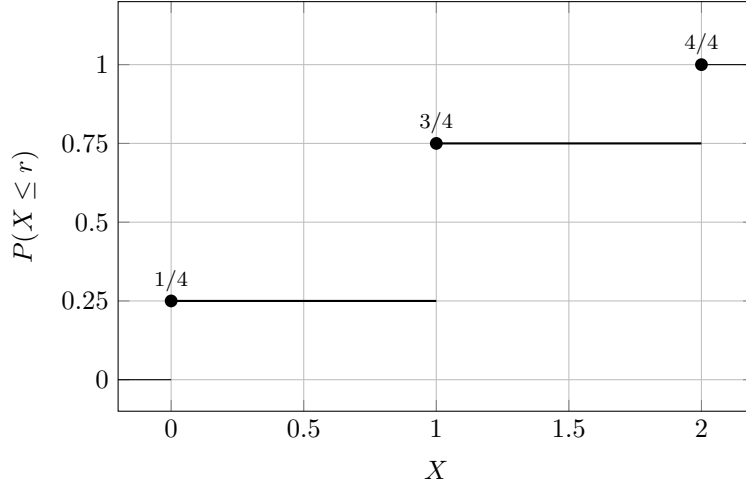
Para  $r \geq 2$ :

$$F(r) = P([X \leq r]) = P(X \leq 2) = P(X = 0) + P(X = 1) + P(X = 2) = 1$$

Logo,  $F$  é dada por:

$$F(r) = \begin{cases} 0, & r < 0 \\ \frac{1}{4}, & r \in [0, 1) \\ \frac{3}{4}, & r \in [1, 2) \\ 1, & r \geq 2 \end{cases}$$

Distribuição de probabilidades acumulada



**Theorem 3.1** (Propriedades da distribuição acumulada). *Seja  $X$  uma variável aleatória definida em  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ , então a f.d.a. de  $X$  ( $F_X$  ou  $F$ ) verifica:*

- a)  $F$  é monótona não decrescente;
- b)  $F$  é contínua à direita;
- c)  $\lim_{t \rightarrow -\infty} F(t) = 0$  e  $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$ .

*Proof.*

- a) Dados  $a, b \in \mathbb{R} : a \leq b$ ;  $[X \leq a] \subseteq [X \leq b] \Rightarrow P([X \leq a]) \leq P([X \leq b]) \Rightarrow F(a) \leq F(b)$ .
- b) Se  $X_n \downarrow x$ , quando  $n \rightarrow \infty$ , temos que  $\{[X \leq x_n]\}_{n \geq 1}$  é tal que  $\bigcap_{n \geq 1} [X \leq x_n] = [X \leq x]$ . Isso significa que  $[X \leq x]$  acontece se e somente se  $[X \leq x_n] \forall n$ . Além disso,  $[X \leq x_n] \downarrow [X \leq x]$  quando  $n \rightarrow \infty$ , logo, pela continuidade da função de probabilidade  $P([X \leq x_n]) \downarrow P([X \leq x]), n \rightarrow \infty$ .
- c) Considere agora que  $x_n \downarrow -\infty \Rightarrow [X \leq x_n] \downarrow \emptyset, n \rightarrow \infty \Rightarrow F(x_n) = P([X \leq x_n]) \downarrow P(\emptyset) = 0, n \rightarrow \infty$ . Se  $x_n \uparrow \infty \Rightarrow [X \leq x_n] \uparrow \Omega, n \rightarrow \infty \Rightarrow F(x_n) = P([X \leq x_n]) \uparrow P(\Omega) = 1, n \rightarrow \infty$ .

□

**Theorem 3.2.** *Se  $F$  é a f.d.a. da variável aleatória  $X$ , então:*

- a) *Existem e são finitos os limites laterais  $\lim_{t \rightarrow r-} F(t), \lim_{t \rightarrow r+} F(t), \forall r \in \mathbb{R}$  e  $\lim_{t \rightarrow r-} F(t) \leq \lim_{t \rightarrow r+} F(t)$ ;*
- b)  $\lim_{t \rightarrow r+} F(t) = F(r), \forall r \in \mathbb{R}$ ;
- c)  $F$  é descontínua em  $r, r \in \mathbb{R}$  se e somente se  $\lim_{t \rightarrow r-} F(t) < F(r)$ , com um salto de tamanho  $F(r) - \lim_{t \rightarrow r-} F(t)$ ;
- d)  $\forall r \in \mathbb{R}, P(X = r) = F(r) - \lim_{t \rightarrow r-} F(t)$ ;
- e) *Existem no máximo um total enumerável de descontinuidades em  $F$ .*

*Proof.*

- a)  $F$  é monótona e limitada ( $0 \leq F \leq 1$ ). Logo, os limites laterais existem e são limitados.
- b) Como  $F$  é monótona não-decrescente,  $\forall x, y : x \leq y \Rightarrow F(x) \leq F(y)$ . Logo  $\lim_{t \rightarrow r^-} F(t) \leq \lim_{t \rightarrow r^+} F(t)$ .
- c) Como  $F$  é monótona não-decrescente, uma descontinuidade só ocorre se e somente se  $\lim_{t \rightarrow r^-} F(t) < \lim_{t \rightarrow r^+} F(t) = F(r)$ .
- d) Seja  $r \in \mathbb{R}$ .  $[X \leq r] = \bigcap_{n=1}^{\infty} (r - \frac{1}{n} < x \leq r)$ , logo:

$$\begin{aligned}
P([X = r]) &= P\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} \left(r - \frac{1}{n} < x \leq r\right)\right) \\
&\Downarrow (\text{Teorema da continuidade}) \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left(r - \frac{1}{n} < x \leq r\right)\right) \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(F(r) - F\left(r - \frac{1}{n}\right)\right) \\
&= F(r) - \lim_{n \rightarrow \infty} F\left(r - \frac{1}{n}\right) \\
P([X = r]) &= F(r) - \lim_{t \rightarrow r^-} F(t)
\end{aligned}$$

- e) Seja  $\mathcal{D}$  o conjunto de pontos de descontinuidades de  $F$ , e seja  $\lim_{t \rightarrow x^-} F(t) = F(x^-)$ . Logo:

$$\mathcal{D} = \{x \in \mathbb{R} : F(x) - F(x^-) > 0\}$$

Seja  $\mathcal{D}_n$  o conjunto de pontos para os quais a amplitude do salto é maior ou igual a  $\frac{1}{n}$ . Logo:

$$\mathcal{D}_n = \left\{x \in \mathbb{R} : F(x) - F(x^-) \geq \frac{1}{n}\right\} \Rightarrow \#D = |D| \leq n$$

Se  $x \in \mathcal{D} \Rightarrow \exists n_0 > 1 : F(x) - F(x^-) \geq \frac{1}{n_0} \Rightarrow x \in \bigcup_{n=1}^{\infty} \mathcal{D}_n$ . Se  $x \in \bigcup_{n=1}^{\infty} \mathcal{D}_n \Rightarrow \exists n_1 : x \in \mathcal{D}_{n_1} \Rightarrow x \in \mathcal{D}$ .  $\mathcal{D}$  portanto é a união enumerável de conjuntos finitos, logo é enumerável.  $\square$

### 3.2 Natureza das variáveis aleatórias

- a)  $X$  é uma variável aleatória discreta se os valores que ela toma pertencem a um conjunto enumerável, logo  $X : \Omega \rightarrow \{x_1, x_2, \dots\}$  (ou seja,  $X(\omega) \in \{x_1, x_2, \dots\}, \forall \omega \in \Omega$ ) e  $P : \{x_1, x_2, \dots\} \rightarrow [0, 1]$  é dado por  $P(x_i) = P\{\omega : \omega \in \Omega \text{ e } X(\omega) = x_i\} \forall i \geq 1$ .
- b)  $X$  é uma variável aleatória absolutamente contínua se  $\exists f$  (uma função) tal que  $f(x) \geq 0, \forall x \in \mathbb{R}$  e  $F_X(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt$  (onde  $f$  é chamada de densidade de  $X$ ).

Sob **(a)** temos que  $[X \leq x] = \bigcup_{i: x_i \leq x} [X = x_i]$ . Logo  $F_X(x) = \sum_{i: x_i \leq x} P(x_i)$ .

Sob **(b)** estamos afirmando que  $F_X$  é a integral de  $f$  (ou seja,  $f$  é a sua derivada) para todo  $x$  exceto em um conjunto de medida de Lebesgue nula, ou seja, se seu comprimento for zero ( $\int_a^a f(t)dt = 0$ ). Ainda sob

**(b)**, se  $f$  é uma função de densidade podemos definir  $F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt$  e  $F$  verifica:

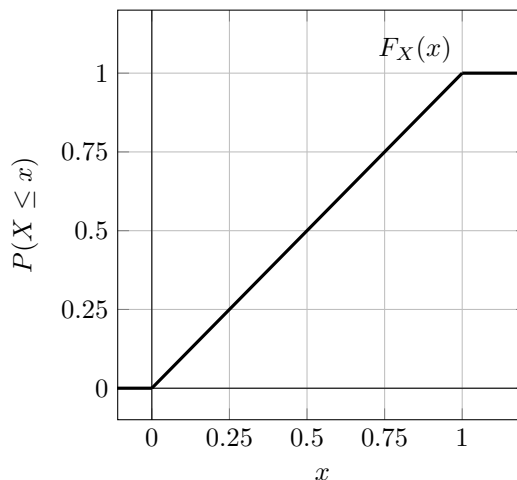
1.  $x \leq y \Rightarrow F(x) \leq F(y)$ ;
2. Se  $x_n \downarrow x \Rightarrow F(x_n) \downarrow F(x)$ ;
3. Se  $x_n \downarrow -\infty \Rightarrow F(x_n) \downarrow 0$  e se  $x_n \uparrow \infty \Rightarrow F(x_n) \uparrow 1$ .

Dada uma variável aleatória com distribuição  $F_X$ ,  $X$  tem densidade se:

- (i)  $F_X$  é contínua;
- (ii)  $F_X$  é derivável por partes (ou derivável no interior de um número finito ou enumerável de intervalos fechados cuja união é igual a  $\mathbb{R}$ ), ou derivável para todo  $x$  exceto um número finito (enumerável) de pontos.

**Example 3.3.**

$$F_X(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & x \in [0, 1] \\ 1, & x > 1 \end{cases}$$

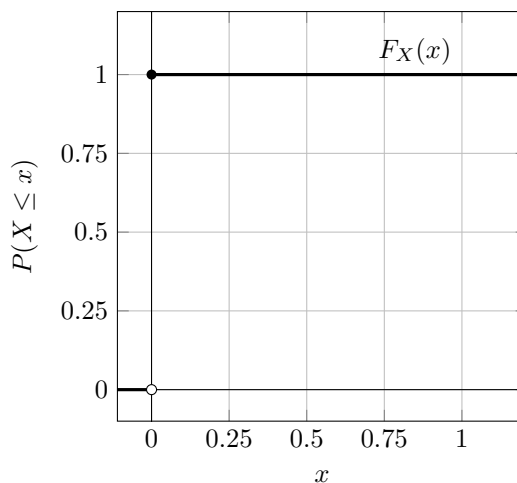


Notas:

- $F_X$  é contínua;
- $\{0, 1\}$  são pontos sem derivada;
- Podemos definir os seguintes intervalos em que  $F_X$  é derivável:  $(-\infty, 0)$ ,  $(0, 1)$ ,  $(1, \infty)$ ;
- $F'_X(x) = \begin{cases} 1, & x \in (0, 1) = f_X(x); \\ 0, & c.c. \end{cases}$ ;
- $f(0)$  e  $f(1)$  podem ser definidos como zero ou um, já que tais definições não alteram  $F_X(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt$ .

Em contrapartida, considere:

$$F_X(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$



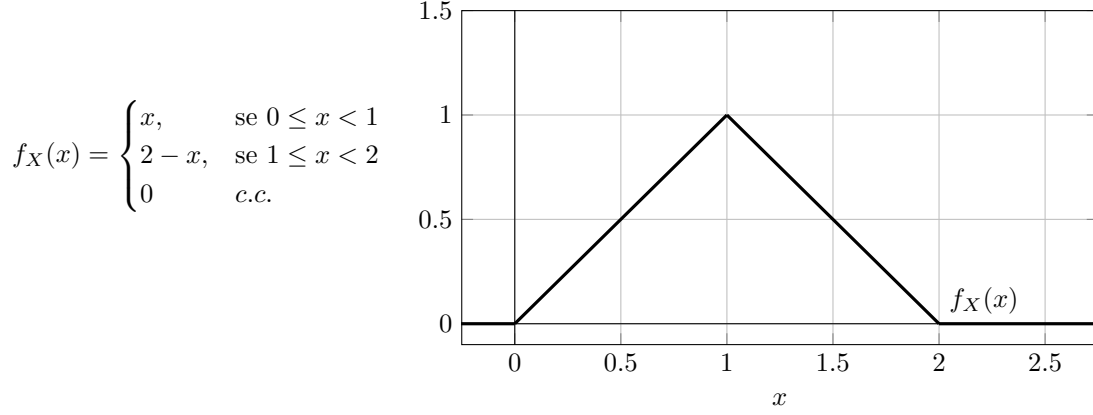
Notas:

- $F_X$  não é contínua;



- $P(X = 0) = \lim_{x \rightarrow 0^+} F_X(x) - \lim_{x \rightarrow 0^-} F_X(x) = 1$ .

**Example 3.4.** Considere a densidade triangular:



Por definição,  $f(x) \geq 0 \forall x$ . Para verificarmos que a probabilidade total é igual a um, podemos realizar a seguinte integração por partes:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^x f_X(x) dx &= \int_0^2 f_X(x) dx \\ &= \int_0^1 x dx + \int_1^2 (2 - x) dx \\ &= \frac{x^2}{2} \Big|_0^1 + 2x \Big|_1^2 - \frac{x^2}{2} \Big|_1^2 \\ &= 1 \end{aligned}$$

O que demonstra que  $f_X(x)$  é densidade de probabilidade.

**Conjecture 3.1.** Cada função de distribuição se corresponde com apenas uma distribuição? Não.

*Proof.* Considere, por exemplo, que a variável aleatória  $X \sim N(0, 1)$ . Logo, a sua função distribuição de probabilidade é dada por  $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$  e  $\Phi(x)$  é sua acumulada. Vejamos que  $X \sim N(0, 1) \iff -X \sim N(0, 1)$ :

Seja  $\omega$  um possível valor de  $-X$ , devemos calcular  $P(-X \leq \omega)$  e provar que  $P(-X \leq \omega) = \Phi(\omega)$ :

$$P(-X \leq \omega) = P(X \geq -\omega) = 1 - P(X \leq \omega) = 1 - \Phi(-\omega) = 1 - (1 - \Phi(\omega)) = \Phi(\omega)$$

□

### 3.3 Variáveis aleatórias e $\sigma$ -álgebra de Borel

Se  $X$  é uma variável aleatória em  $(\Omega, \mathcal{A}, P)$ , cada evento  $[X \leq x] \in \mathcal{A} \forall x \in \mathbb{R}$ . Isto é,  $[X \in \mathcal{B}]$ , onde  $[X \in \mathcal{B}] = [X \leq x]$  é um evento e  $P(X \in \mathcal{B})$  é bem definido. No entanto, a operacionalidade do sistema  $(\Omega, \mathcal{A}, P)$  pode ser estendido a todo boreliano (ou seja, a todos os elementos da  $\sigma$ -álgebra de Borel, que é a menor  $\sigma$ -álgebra contendo os intervalos cujos comprimentos estejam bem definidos).

**Proposition 3.1.** Se  $X$  é uma variável aleatória em  $(\Omega, \mathcal{A}, P)$ , então o evento  $[x \in \mathcal{B}] = \{\omega : \omega \in \Omega \text{ e } X(\omega) \in \mathcal{B}\}$  é um evento aleatório para todo  $\mathcal{B}$  boreliano (ou seja,  $[x \in \mathcal{B}] \in \mathcal{A} \forall \mathcal{B} \in \mathcal{B}$ ).

Podemos ver que diferentes tipos de intervalos (leia-se borelianos) podem ser mostrados como pertencentes à  $\sigma$ -álgebra, de modo que variáveis aleatórias que operam sobre esses intervalos estarão bem definidas:

1. Se  $B = (-\infty, b] \Rightarrow [X \in B] \in \mathcal{A}$  de acordo com a definição de variável aleatória;
2. Se  $B = (a, \infty)$ , podemos fazer  $B = (-\infty, a]^c$ . Como o evento  $[X \leq a] \in \mathcal{A}$  por definição, sendo  $\mathcal{A}$  uma  $\sigma$ -álgebra, deve ocorrer que  $[X \leq a]^c = B \in \mathcal{A}$ , ou seja,  $B \in \mathcal{A}$ ;
3. Se  $B = (a, b] \Rightarrow [X \in B] = [X \in (a, b]] = [X \leq b] - [X \leq a]$ . Como  $[X \leq b] \in \mathcal{A}$  e  $[X \leq a] \in \mathcal{A}$ , então  $P(X \in B) = P(X \leq b) - P(X \leq a) = F_X(b) - F_X(a)$ ;
4. Se  $B = (a, b) \Rightarrow B = \bigcup_{n=1}^{\infty} (a, b - \frac{1}{n}]$ . Sabemos que os eventos  $(a < X \leq b - \frac{1}{n}) \in \mathcal{A}$  e as suas uniões também pertencem à  $\mathcal{A}$ . Quanto à probabilidade, temos  $P(X \in B) = P(\bigcup_{n=1}^{\infty} (a < X \leq b - \frac{1}{n})) = \lim_{n \rightarrow \infty} P((a < X \leq b - \frac{1}{n})) = \lim_{n \rightarrow \infty} F_X(b - \frac{1}{n}) - F_X(a) = F_X(b^-) - F_X(a)$ ;
5. Se  $B = \bigcup_{i=1}^n B_i : B_i \in \mathcal{A} \forall i$ , e sendo os  $B_i$ 's disjuntos, temos que  $[X \in B] = \bigcup_{i=1}^n [X \in B_i] \Rightarrow P([X \in B]) = \sum_{i=1}^n P(X \in B_i)$ .

Podemos assim reformular os axiomas de Kolmogorov:

- $Ax_1(K)$ :  $P_X(B) = P(X \in B) \geq 0$ ;
- $Ax_2(K)$ :  $P_X(\mathbb{R}) = P(X \in \mathbb{R}) = 1$ ;
- $Ax_3(K)$ : Se  $B_1, \dots, B_n \in \mathcal{B}$ , com  $B_i \cap B_j = \emptyset \forall i \neq j \Rightarrow P_X(\bigcup B_n) = P(X \in \bigcup B_n) = P(\bigcup_n [X \in B_n]) = \sum_n P(X \in B_n)$ .

**Definition 3.3.** A probabilidade  $P_X$  definida na  $\sigma$ -álgebra de Borel por  $P_X(B) = P(X \in B)$  é a distribuição de  $X$ .

**Proposition 3.2.**

- a) Se  $X$  é uma variável aleatória discreta com valores em  $\{x_1, x_2, \dots\} \Rightarrow P_X(B) = \sum_{i: x_i \in B} P(x_i)$ ;
- b) Se  $X$  é absolutamente contínua com densidade  $f \Rightarrow P_X(B) = \int_B f_X dx$ .

### 3.4 Variáveis contínuas

**Proposition 3.3.** Se  $X \sim f_X$ ,  $y = bx + c$ ,  $b > 0$  e  $c \in \mathbb{R} \Rightarrow Y \sim f_Y$  onde  $f_Y(y) = \frac{1}{b} f_X(\frac{y-c}{b})$ ;  $y \in \mathbb{R}$ , onde  $c$  é dito um parâmetro de posição (muitas vezes de posição central) e  $b$  um parâmetro de escala.

#### 3.4.1 Exemplos

**Example 3.5** (Distribuição Normal).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \Rightarrow f_{\mu, \sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Aqui,  $\mu$  representa a média (posição central) da distribuição e  $\sigma^2$  a sua variância.

**Example 3.6** (Distribuição Cauchy).

$$f(x) = \frac{1}{\pi(1+x^2)} \Rightarrow f_{b,M}(x) = \frac{1}{b} \frac{1}{\pi \left(1 + \left(\frac{x-M}{b}\right)^2\right)} = \frac{b}{\pi(b^2 + (x-M)^2)}$$

Neste caso,  $M$  é a mediana da distribuição e  $b$  representa a distância entre  $M$  e o 1º quartil da distribuição.

**Example 3.7** (Distribuições Exponencial e Gamma). Considere  $g(x) = e^{-x} I_{0,\infty}(x)$ . Sabemos que  $g$  é uma distribuição de probabilidade pois:

$$\begin{cases} g(x) \geq 0 \forall x \in (0, \infty) \\ \int_0^{\infty} e^{-x} dx = 1 \end{cases}$$

Vamos agora incluir no formato do tipo exponencial um componente polinomial. Dado  $\alpha > 0$ , defina  $g(x) = x^{\alpha-1} e^{-x}$ . Podemos ver que  $g$  é integrável, de modo que:

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

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\alpha)}x^{\alpha-1}e^{-x} & x > 0 \\ 0 & \text{c.c.} \end{cases}$$

Defina agora  $y = \frac{X}{\beta}$  onde  $X \sim \text{Gamma}(\alpha, 1)$  e  $\beta > 0$ . A densidade de  $Y$  pode ser encontrada por meio de:

$$P(Y \leq y) = P\left(\frac{X}{\beta} \leq y\right) = P(X \leq \beta y) \Rightarrow F_Y(y) = F_X(\beta y)$$

$$f_Y(y) = \beta f_X(\beta y) = \beta \frac{(\beta y)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} e^{-\beta y} = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} y^{\alpha-1} e^{-\beta y}$$

Nesse caso (conhecido como distribuição Gama)  $\frac{1}{\beta}$  é um parâmetro de escala e  $\alpha$  é um parâmetro de forma. Temos alguns casos especiais, como:

- Se  $\alpha = 1$  :  $Y \sim \text{Exp}(\beta)$ ;
- Se  $\alpha = \frac{n}{2}$ , com  $n$  inteiro e  $\beta = \frac{1}{2}$  :  $Y \sim \chi^2(n)$

### 3.5 Variáveis aleatórias multidimensionais

**Definition 3.4.** A distribuição de probabilidades do vetor aleatório dado por  $(x_1, \dots, x_n)$  é uma tabela que associa a cada valor  $(x_1, \dots, x_n)$  sua probabilidade  $P(x_1, \dots, x_n) = P(X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n)$ , onde  $p$  é a distribuição conjunta.

**Example 3.8.** Considere o conjunto de 32 cartas para poker: 7,8,9,10,J,Q,K,A, dos 4 naipes. Duas cartas são retiradas aleatoriamente, sem reposição, e  $X$  = número de ases que a pessoa recebe e  $Y$  = número de cartas de copas que a pessoa recebe. Qual a probabilidade  $P(X = 0, Y = 0)$ ?

$$P(X = 0, Y = 0) = \frac{\binom{21}{2}}{\binom{32}{2}} = \frac{210}{496}$$

**Definition 3.5.** A função de distribuição acumulada do par de variáveis aleatórias  $(X, Y)$  é dada por:

$$F(X, Y) = P(X \leq x, Y \leq y) = \sum_{\{i: x_i \leq x\}} \sum_{\{j: y_j \leq y\}} P(X = x_i, Y = y_j)$$

Seja  $\underline{X} = (X_1, \dots, X_n)$  tal que  $X_i$  é variável aleatória definida em  $(\Omega, \mathcal{A}, P) \forall i$ . Então  $F$ , a acumulada de  $\underline{X}$  verifica:

- $F_1$ :  $F$  é não decrescente em cada uma das coordenadas;
- $F_2$ :  $F$  é contínua à direita em cada uma das coordenadas;
- $F_3$ :  $\lim_{x_i \rightarrow -\infty} F(x_1, \dots, x_n) = 0$  e  $\lim_{x_i \rightarrow \infty \forall i} F(x_1, \dots, x_n) = 1$ .

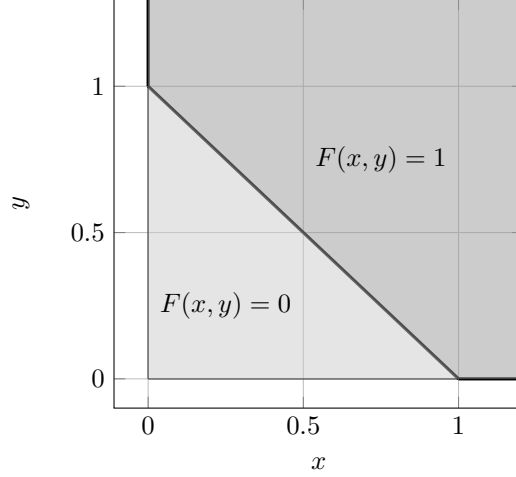
As provas de  $F_1$  e  $F_2$  são de simples construção. Para  $F_3$  temos:

*Proof.* Considere  $i$  fixo e o evento  $[X_1 \leq x_1, \dots, X_{i-1} \leq x_{i-1}, X_i \leq -m, X_{i+1} \leq x_{i+1}, \dots, X_n \leq x_n]$ . Logo,  $F(x_1, \dots, x_{i-1}, -m, x_{i+1}, \dots, x_n) \xrightarrow{m \rightarrow \infty} 0$ .

Por outro lado, note que  $[X_1 \leq x_1, \dots, X_{i-1} \leq x_{i-1}, X_i \leq m, X_{i+1} \leq x_{i+1}, \dots, X_n \leq x_n] \xrightarrow{m \rightarrow \infty} [X_1 \leq x_1, \dots, X_{i-1} \leq x_{i-1}, X_{i+1} \leq x_{i+1}, \dots, X_n \leq x_n]$  (que é o evento marginal sem o  $X_i$ ). Já se  $x_i \rightarrow \infty \forall i$  :  $\bigcap_{i=1}^n [X_i \leq x_i] \uparrow \Omega \Rightarrow F(x_1, \dots, x_n) = P(\bigcap_{i=1}^n [X_i \leq x_i]) \uparrow 1, x_i \rightarrow \infty \forall i$ .  $\square$

$F_1, F_2$  e  $F_3$  não são condições suficientes para que  $F$  seja uma função de distribuição acumulada. Vejamos um exemplo que segue  $F_1, F_2$  e  $F_3$  e que não é função de distribuição acumulada:

Seja  $F_0(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \geq 0, y \geq 0, x + y \geq 1 \\ 0 & \text{c.c.} \end{cases}$ . Graficamente, temos:



É fácil ver que  $F_0$  segue  $F_1, F_2$  e  $F_3$ , mas vejamos que  $F_0$  atribui probabilidade negativa a certos eventos, a ver  $[0 \leq X \leq 1, 0 \leq Y \leq 1]$ :

$$\begin{aligned}
 F_0(0, 0) &= P(X \leq 0, Y \leq 0) \\
 F_0(1, 1) &= P(X \leq 1, Y \leq 1) \\
 F_0(1, 1) - F_0(1, 0) &= P(X \leq 1, Y \leq 1) - P(X \leq 1, Y \leq 0) = P(X \leq 1, 0 \leq Y \leq 1) \\
 F_0(0, 1) - F_0(0, 0) &= P(X \leq 0, Y \leq 1) - P(X \leq 0, Y \leq 0) = P(X \leq 0, 0 \leq Y \leq 1) \\
 F_0(1, 1) - F_0(1, 0) - F_0(0, 1) - F_0(0, 0) &= P(X \leq 1, 0 \leq Y \leq 1) - P(X \leq 0, 0 \leq Y \leq 1) \\
 &= P(0 \leq X \leq 1, 0 \leq Y \leq 1) = -1
 \end{aligned}$$

Defina  $\Delta_{k,I}(g(x_1, \dots, x_k)) = g(x_1, \dots, x_{k-1}, b) - g(x_1, \dots, x_{k-1}, a)$  onde  $g : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}; I = (a, b], a \leq b$ . Logo, se  $I_1 = (a_1, b_1]$  e  $I_2 = (a_2, b_2]$ ,  $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ . Então:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{1,I_1}(\Delta_{2,I_2}(F(x, y))) &= \Delta_{1,I_1}(F(x, b_2) - F(x, a_2)) \\
 &= F(b_1, b_2) + F(a_1, a_2) - F(a_1, b_2) - F(b_1, a_2) \geq 0 \\
 &= P(a_1 < X \leq b_1, a_2 < Y \leq b_2) \geq 0
 \end{aligned}$$

No geral:

$$\bullet F_4: \Delta_{1,I_1} \Delta_{2,I_2} \dots \Delta_{n,I_n}(F(x_1, \dots, x_n)) \geq 0 \quad \forall I_k = (a_k, b_k]; a_k \leq b_k, k = 1, \dots, n.$$

**Definition 3.6.** Seja  $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  seguindo  $F_1, F_2, F_3$  e  $F_4$ , logo  $F$  é uma função de distribuição acumulada n-dimensional (ou n-variada).

- **a)** Se o vetor aleatório  $(X_1, \dots, X_n)$  toma valores em um conjunto discreto, o vetor é discreto;
- **b)** Se para o vetor aleatório  $(X_1, \dots, X_n)$ ,  $F$  é dada pela forma  $F(x_1, \dots, x_n) = \int_{-\infty}^{x_n} \dots \int_{-\infty}^{x_1} f(t_1, \dots, t_n) dt_n \dots dt_1$ ,  $\forall (x_1, \dots, x_n)$  onde  $f(t_1, \dots, t_n) \geq 0 \quad \forall (t_1, \dots, t_n) \in \mathbb{R}^n$  então  $(X_1, \dots, X_n)$  é um vetor absolutamente contínuo com densidade  $f$  (densidade conjunta).

**Definition 3.7.** A probabilidade definida em  $\mathcal{B}^n$  (borelianos em  $\mathbb{R}^n$ ) por  $P(\underline{X} \in B)$  (com  $B \in \mathcal{B}^n$ ) é chamada de distribuição conjunta de  $\underline{X} = (X_1, \dots, X_n)$ , com notação:  $P_{\underline{X}}(B) = P(\underline{X} \in B)$ .

**Proposition 3.4.**

- **a)** Se o vetor aleatório  $\underline{X}$  é discreto,  $P_{\underline{X}}(B) = \sum_{\{i: x_i \in B\}} P(X_i = x_i) \quad \forall B \in \mathcal{B}^n$ ;
- **b)** Se  $\underline{X}$  é absolutamente contínuo com densidade  $f$ ,  $P_{\underline{X}}(B) = P(\underline{X} \in B) = \int \dots \int_B f(x_1, \dots, x_n) dx_n \dots dx_1$ .

### 3.6 Independência

**Definition 3.8.** As variáveis aleatórias são (coletivamente) independentes se:

$$P(X_1 \in B_1, \dots, X_n \in B_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i \in B_i), \forall B_i \in \mathcal{B}^n, \forall i = 1, \dots, n$$

Se  $X_1, \dots, X_n$  são coletivamente independentes, então  $X_{i1}, \dots, X_{ik}$  são coletivamente independentes  $\forall k$ .

#### 3.6.1 Critérios ou consequências

**Proposition 3.5.**

- **a)** Se  $X_1, \dots, X_n$  são independentes, então  $F_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n F_{X_i}(x_i), \forall (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ ;
- **b)** Se existem funções  $F_1, \dots, F_n$  tais que  $\lim_{n \rightarrow \infty} F_i(x) = 1, \forall i$  e  $F_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n F_i(x_i), \forall (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \Rightarrow X_1, \dots, X_n$  são independentes e  $F_i = F_{X_i}, \forall i$ .

*Proof.*

- **a)** Se  $X_1, \dots, X_n$  são coletivamente independentes e tomamos  $[X_i \leq x_i] = (-\infty, x_i] = B_i$ . Então:

$$\begin{aligned} F_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n) &= P(X_1 \leq x_1, \dots, X_n \leq x_n) \\ &= P(X_1 \in B_1, \dots, X_n \in B_n) \\ &\stackrel{Ind}{=} \prod_{i=1}^n P(X_i \in B_i) \\ &= \prod_{i=1}^n P(X_i \leq x_i) = \prod_{i=1}^n F_{X_i}(x_i) \quad \forall (x_1, \dots, x_n) \end{aligned}$$

- **b)** Para cada  $i$ ,  $F_{X_i}(x_i) = P(X_i \leq x_i) = \lim_{m \rightarrow \infty} P(X_1 \leq m, \dots, X_{i-1} \leq m, X_i \leq x_i, X_{i+1} \leq m, \dots, X_n \leq m)$ , de modo que:

$$\begin{aligned} F_{X_i}(x_i) &= \lim_{m \rightarrow \infty} F_{X_1 \dots X_n}(m, \dots, m, x_i, m, \dots, m) \\ &\stackrel{Hip}{=} \lim_{m \rightarrow \infty} \left( \prod_{j=1}^{i-1} F_j(m) \times F_i(x_i) \times \prod_{j=i+1}^n F_j(m) \right) \\ &= F_i(x_i) \end{aligned}$$

Logo, a marginal de  $X_i$  é precisamente  $F_i, \forall i$ . Devemos ainda verificar que  $P(X_1 \in B_1, \dots, X_n \in B_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i \in B_i) \forall B_i \in \mathcal{B}^n$ . Considere  $B_i = (a_i, b_i], a_i \leq b_i, a_i, b_i \in \mathbb{R}$ . Temos que:

$$\begin{aligned} P(X_1 \in B_1, \dots, X_n \in B_n) &= P(a_1 < X_1 \leq b_1, \dots, a_n < X_n \leq b_n) \\ &= \Delta_{1, I_1} \dots \Delta_{n, I_n} (F_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n)) \\ &\stackrel{Ind}{=} \Delta_{1, I_1} \dots \Delta_{n, I_n} (F_{X_1}(x_1) \dots F_{X_n}(x_n)) \\ &= [F_{X_1}(b_1) - F_{X_1}(a_1)] \times \dots \times [F_{X_n}(b_n) - F_{X_n}(a_n)] \\ &= \prod_{i=1}^n P(a_i < X_i \leq b_i) = \prod_{i=1}^n P(X_i \in B_i) \end{aligned}$$

□

### 3.6.2 Caso contínuo

#### Proposition 3.6.

- **a)** Se  $X_1, \dots, X_n$  são independentes e possuem densidades  $f_{X_1}, \dots, f_{X_n}$ , respectivamente, então  $f_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f_{X_i}(x_i) \forall (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$  é a densidade conjunta de  $X_1, \dots, X_n$ ;
- **b)** Se  $X_1, \dots, X_n$  tem densidade conjunta  $f_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n) : f_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f_i(x_i) \forall (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ , onde  $f_i(x) \geq 0 \forall x : \int_{-\infty}^{\infty} f_i(x) dx = 1 \forall i$ , então  $X_1, \dots, X_n$  são independentes e  $f_i$  é a densidade marginal de  $X_i \forall i$ .

*Proof.*

- **a)** Como consequência da proposição 3.5, temos que:  $F_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n F_{X_i}(x_i), \forall (x_1, \dots, x_n)$ . Logo, por definição temos:

$$\prod_{i=1}^n F_{X_i}(x_i) = \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{x_i} f_{X_i}(t) dt = \int_{-\infty}^{x_1} \dots \int_{-\infty}^{x_n} f_{X_1}(t_1) \dots f_{X_n}(t_n) dt_n \dots dt_1$$

Assim,  $f_{X_1}, \dots, f_{X_n}$  é a densidade conjunta.

- **b)** Considere:

$$\begin{aligned} F_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n) &= \int_{-\infty}^{x_1} \dots \int_{-\infty}^{x_n} f_{X_1 \dots X_n}(t_1, \dots, t_n) dt_n \dots dt_1 \\ &= \int_{-\infty}^{x_1} \dots \int_{-\infty}^{x_n} f_1(t_1) \dots f_n(t_n) dt_n \dots dt_1 \\ &= \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{x_i} f_i(t_i) dt_i \end{aligned}$$

Defina  $F_i(x) = \int_{-\infty}^x f_i(t) dt$ . Sendo assim:

$$\prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{x_i} f_i(t_i) dt_i = \prod_{i=1}^n F_i(x_i)$$

Note que, pela hipótese nas  $f_i$ 's, as  $F_i$ 's são acumuladas em particular, e  $F_i(x) \rightarrow 1, x \rightarrow \infty$ , e pela proposição 3.5:  $F_i(x) = F_{X_i}(x_i)$ , logo  $f_{X_i} = f_i$ .

□

### 3.6.3 Propriedades

- **a)** Se  $F(x, y)$  é a função de distribuição acumulada conjunta de  $(X, Y)$ , então  $F_X(x) = \lim_{y \rightarrow \infty} F(x, y) = F(x, \infty)$  é a função de distribuição acumulada marginal de  $X$ ;
- **b)** Se  $f(x, y)$  é a função de densidade conjunta de  $(X, Y)$ , então  $f_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy$  é a densidade marginal de  $X$ .

#### Example 3.9.

$$f_{XY}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[ \left( \frac{x-\mu_1}{\sigma_1} \right)^2 + \left( \frac{y-\mu_2}{\sigma_2} \right)^2 - 2\rho \left( \frac{x-\mu_1}{\sigma_1} \right) \left( \frac{y-\mu_2}{\sigma_2} \right) \right] \right\}$$

Sendo  $\sigma_i > 0, i = 1, 2; -1 < \rho < 1; \mu_i \in \mathbb{R}, i = 1, 2$ . Logo,  $(X, Y) \sim N_2 \left( \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho \\ \rho & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \right)$ , onde, caso  $\rho = 0, X$  e  $Y$  são independentes.

### 3.7 Distribuições de funções de vetores

Seja  $\underline{X} = (X_1, \dots, X_n)$  um vetor aleatório em  $(\Omega, \mathcal{A}, P)$ . Seja  $Y = g(X_1, \dots, X_n)$ . Qual a distribuição de  $Y$ ?

- **Nota 1:** Para que  $Y$  seja variável aleatória cada  $B \in \mathcal{B}$  é necessário que  $g^{-1}(B)$  seja mensurável, ou seja:

$$\begin{aligned} g^{-1}(B) &= \{x : g(x) \in B\} \\ &\Downarrow \\ F_Y(y) &= P(g(x) \leq y) \end{aligned}$$

Generalizando, se  $Y = g(X_1, \dots, X_n)$ :

$$F_Y(y) = P(g(X_1, \dots, X_n) \leq y) = P((X_1, \dots, X_n) \in B_y) = P_{\underline{X}}(B_y)$$

Onde  $B_y = \{(x_1, \dots, x_n) : g(x_1, \dots, x_n) \leq y\}$ .

- **Nota 2:** Se  $\underline{X}$  for discreto:

$$P_Y(y_j) = \sum_{\{i: g(x_i) = y_j\}} P_{\underline{X}}(x_i)$$

**Example 3.10.** Sejam  $X \sim U(0, 1)$  e  $Y = -\ln(x)$ . Temos que  $\forall x$  valor de  $X : x \in (-\infty, 0] \cup [1, \infty)$  o valor de  $f_X(x) = 0$ . Seja  $x \in (0, 1) \Leftrightarrow -\ln(x) \in (0, \infty)$ , logo  $\forall y$  valor de  $Y : y \in (0, \infty)$ . Calculemos  $F_Y(y) = P(Y \leq y)$ :

$$\begin{aligned} F_Y(y) &= P(Y \leq y) = P(-\ln(X) \leq y) \\ &= P(\ln(X) \geq -y) \\ &= P(X \geq e^{-y}) \\ &= 1 - P(X < e^{-y}) = 1 - e^{-y} \end{aligned}$$

Assim, temos que  $Y \sim \text{Exp}(1)$ .

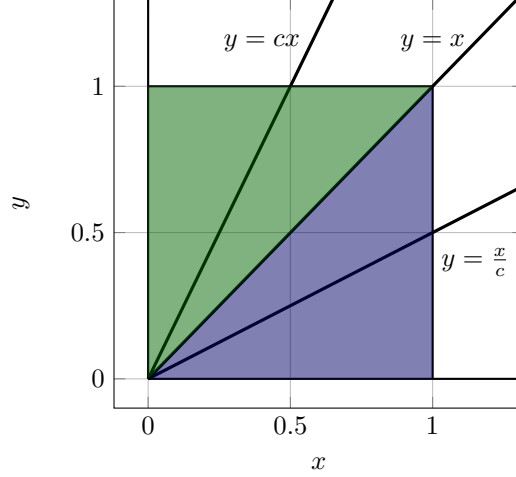
**Example 3.11.** Sejam  $X \perp Y; X \sim U(0, 1); Y \sim U(0, 1); Z = \frac{X}{Y}$ . Determinar a distribuição de  $Z$ : Os valores que geram indefinição de  $Z$  são:  $X = Y = 0$  e  $Y = 0, X > 0$ , assim a boa definição de  $Z$  é no espaço  $[0 < X \leq 1, 0 < Y \leq 1]$ . Vejamos se esse intervalo contém toda a massa de probabilidade:

$$P([0 < X \leq 1, 0 < Y \leq 1]) = P(0 < X \leq 1) \times P(0 < Y \leq 1) = 1 \times 1 = 1$$

Logo, basta avaliar o conjunto  $[0 < X \leq 1, 0 < Y \leq 1] \Rightarrow [Z \in (0, \infty)]$ . Assim, calculemos  $F_Z(z)$ :

$$F_Z(z) = P(Z \leq z) = P\left(\frac{X}{Y} \leq z\right) \Rightarrow \left[\frac{X}{Y} \leq z\right] = [X \leq zY] = \left[\frac{X}{z} \leq Y\right]$$

Sabemos que  $X$  e  $Y$  pertencem ao intervalo  $(0, 1] \times (0, 1]$ , de modo que temos duas regiões genéricas para explorar:  $z < 1$  e  $z > 1$ . De maneira gráfica, temos as seguintes regiões (considere  $c > 1$ ):



Podemos ver que a região azul corresponde aos casos onde  $z > 1$  e a região verde corresponde aos casos onde  $z < 1$ . Assim:

- $z < 1$ :

$$F_Z(z) = \int_0^z \int_0^{\frac{x}{z}} dy dx = \int_0^z y \Big|_0^{\frac{x}{z}} dx = \int_0^z \frac{x}{z} dx = \frac{1}{z} \times \frac{x^2}{2} \Big|_0^z = \frac{z^2}{2z} = \frac{z}{2}$$

- $z > 1$ :

$$F_Z(z) = 1 - \frac{1}{2z}$$

De modo que a distribuição acumulada de  $Z$  é dada por:

$$F_Z(z) = \begin{cases} 0 & , z \in (-\infty, 0] \\ \frac{z}{2} & , z \in (0, 1) \\ 1 - \frac{1}{2z} & , z \in [1, \infty) \end{cases}$$

Assim,  $F_Z(z) = P\left(\frac{X}{Y} \leq z\right) = P((X, Y) \in B_z)$ , onde os conjuntos  $B_z$  podem ter formatos diferentes dependendo de  $z$ . A densidade será dada pela derivada de  $F_Z(z)$  com relação a  $z$ :

$$f_Z(z) = \begin{cases} 0 & , z \leq 0 \\ \frac{1}{2} & , z \in (0, 1) \\ \frac{1}{2z^2} & , z \geq 1 \end{cases}$$

### 3.7.1 Distribuição da Soma

#### Proposition 3.7.

- **a)** Se  $X$  e  $Y$  tem densidade conjunta  $f(x, y) \Rightarrow f_{X+Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z-t, t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t, z-t) dt$ ;
- **b)** Se  $X \perp Y$  e  $f_X$  e  $f_Y$  são suas marginais, então  $f_{X+Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(z-t) f_Y(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(t) f_Y(z-t) dt$ .

*Proof.* Seja  $Z = X + Y \Rightarrow [Z \leq z] = [X + Y \leq z] = [(x, y) \in B_z]$ . Considerando  $B_z = \{(x, y) : x + y \leq z\} = \{(x, y) : x \leq z - y\}$ , temos que:

$$F_Z(z) = \int \int_{B_z} f(x, y) dx dy = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{z-y} f(x, y) dx dy$$

Seja  $y$  um valor fixo e defina  $s = x + y, ds = dx$ . Quando  $x = z - y \Rightarrow s = z$ , temos:

$$F_Z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^z f(s - y, y) ds dy = \int_{-\infty}^z \int_{-\infty}^{\infty} f(s - y, y) dy ds = \int_{-\infty}^z g(s) ds$$

E  $g$  é a densidade de  $X + Y$ , ou seja,  $g(s) = f_{X+Y}(s)$ . □



### 3.7.2 Convolução

Se  $f_1$  e  $f_2$  são densidades de variáveis aleatórias, sua convolução  $f_1 * f_2$  é:

$$f_1 * f_2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x-t)f_2(t)dt$$

Assim, no caso da soma da proposição 3.7, podemos ver que:

$$f_{X+Y}(z) = f_X * f_Y(z)$$

### 3.7.3 Independência

**Proposition 3.8.** *Se  $X_1, \dots, X_n$  são variáveis aleatórias independentes, então funções de famílias disjuntas de  $\{X_i\}_{i \geq 1}$  também são independentes.*

*Prova: Caso especial.* Considere  $Y_i = g_i(X_i)$ . É necessário provar que  $F_{Y_1 \dots Y_n}(y_1, \dots, y_n) = \prod_{i=1}^n F_{Y_i}(y_i)$ :

$$\begin{aligned} F_{Y_1 \dots Y_n}(y_1, \dots, y_n) &= P(g_1(x_1) \leq y_1, \dots, g_n(x_n) \leq y_n) \\ &= P(X_1 \in g_1^{-1}((-\infty, y_1]), \dots, X_n \in g_n^{-1}((-\infty, y_n])) \\ &= \prod_{i=1}^n P(X_i \in g_i^{-1}((-\infty, y_i])) \\ &= \prod_{i=1}^n P(g_i(X_i) \in (-\infty, y_i]) = \prod_{i=1}^n F_{Y_i}(y_i) \end{aligned}$$

□

**Example 3.12.** Considere  $X \perp Y$ ,  $X \sim \text{Exp}(1)$  e  $Y \sim \text{Exp}(1)$ . Determine:

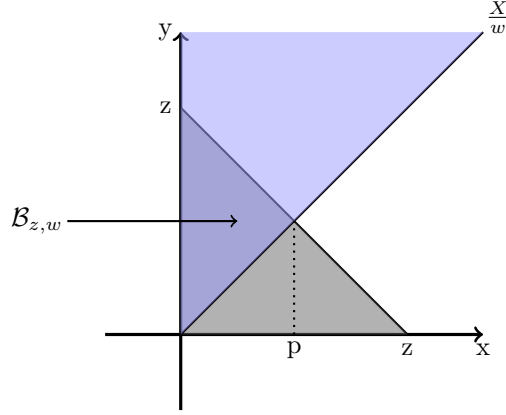
- a) A distribuição de  $Z = X + Y$  e  $W = \frac{X}{Y}$ ;
- b) Mostrar que  $Z \perp W$ .

a)

Como os valores de  $X$  e  $Y$  são sempre positivos, os valores de  $Z$  e  $W$  também o serão. Verifiquemos que  $F_{ZW}(z, w) = F_Z(z)F_W(w)$ :

$$\begin{aligned} P[Z \leq z, W \leq w] &= F_{ZW}(z, w) \\ &= \left[ X + Y \leq z, \frac{X}{Y} \leq w \right] \\ &= \left[ Y \leq z - X, \frac{X}{w} \leq Y \right] \end{aligned}$$

Vejamos que temos que considerar que  $Y \leq z - X$  e que  $\frac{X}{w} \leq Y$ , ou seja, temos que avaliar as variáveis no seguinte boreliano:



Onde a região em azul claro são os valores onde  $Y \geq \frac{X}{w}$ , e a região cinza são os valores em que  $Y \leq z - X$ , o ponto  $p$  é dado por:

$$\begin{aligned}\frac{X}{w} &= z - X \Rightarrow z = X \left( \frac{1}{w} + 1 \right) \\ z &= X \left( \frac{w+1}{w} \right) \\ X &= \frac{zw}{w+1}\end{aligned}$$

Assim, estamos interessados em encontrar  $P((X, Y) \in \mathcal{B}_{z,w})$ , que será:

$$\begin{aligned}P((X, Y) \in \mathcal{B}_{z,w}) &= \int_0^p \int_{\frac{x}{w}}^{z-x} e^{-x} e^{-y} dy dx \\ &= \int_0^{\frac{zw}{w+1}} e^{-x} \left[ -e^{-y} \Big|_{\frac{x}{w}}^{z-x} \right] dx \\ &= \int_0^{\frac{zw}{w+1}} e^{-x} \left[ e^{-\frac{x}{w}} - e^{-z+x} \right] dx \\ &= \int_0^{\frac{zw}{w+1}} e^{-x \left( \frac{1+w}{w} \right)} - e^{-z} dx \\ &= -\frac{w}{(1+w)} e^{-x \left( \frac{1+w}{w} \right)} \Big|_0^{\frac{zw}{w+1}} - e^{-z} x \Big|_0^{\frac{zw}{w+1}} \\ &= \frac{w}{1+w} (1 - e^{-z} - ze^{-z})\end{aligned}$$

Assim, temos que a distribuição de  $Z$  e  $W$  será dada por:

$$F_{ZW}(z, w) = \begin{cases} 0 & , z \leq 0, w \leq 0 \\ \frac{w}{1+w} (1 - e^{-z} - ze^{-z}) & , z > 0, w > 0 \end{cases}$$

Que é uma distribuição de probabilidade, pois é absolutamente contínua (e por consequência, contínua à direita) e os seguintes limites são bem definidos:

$$\begin{aligned}\lim_{w \rightarrow 0} F_{ZW}(z, w) &= 0 \\ \lim_{z \rightarrow 0} F_{ZW}(z, w) &= 0 \\ \lim_{z \rightarrow \infty, w \rightarrow \infty} F_{ZW}(z, w) &= 1\end{aligned}$$

b)

Temos que as distribuições marginais de  $Z$  e  $W$  serão:

$$F_Z(z) = \lim_{w \rightarrow \infty} F_{ZW}(z, w) = 1 - e^{-z} - ze^{-z}$$

$$F_W(w) = \lim_{z \rightarrow \infty} F_{ZW}(z, w) = \frac{w}{1+w}$$

E como a distribuição conjunta é o produto das marginais, temos que  $Z \perp W$ . As densidades serão dadas pelas derivadas da distribuição acumulada conjunta, ou seja:

$$f_{ZW}(z, w) = \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial}{\partial w} \left( \frac{w}{1+w} (1 - e^{-z} - ze^{-z}) \right)$$

$$= \frac{1}{(1+w)^2} ze^{-z} I_{(0,\infty)}(z) I_{(0,\infty)}(w)$$

### 3.8 Método do Jacobiano

Seja  $g : G_0 \rightarrow G$ , com  $G, G_0 \subseteq \mathbb{R}^n$  e ambos abertos. Então  $g(x_1, \dots, x_n) = (g_1(x_1, \dots, x_n), \dots, g_n(x_1, \dots, x_n)) = (y_1, \dots, y_n)$ , com  $g$  sendo bijetiva, ou seja, para todo  $y$  valor de  $Y$ , existe  $\underline{x}$  valor de  $X$  tal que  $g(\underline{x}) = y$ .

Logo  $g$  admite inversa usual  $g^{-1} = h$ , com  $h = (h_1, \dots, h_n)$ :

$$x_1 = h_1(y_1, \dots, y_n)$$

$$\vdots$$

$$x_n = h_n(y_1, \dots, y_n)$$

Vamos supor que existem as derivadas parciais  $\frac{\partial x_i}{\partial y_j}, \forall i, \forall j$ , e que elas são contínuas em  $G$ . Desejamos computar:  $\int \dots \int_C f_Y(y) dy$ , em termos de  $\int \dots \int_D f_X(x) dx$ .

**Example 3.13.** Sejam  $Y = (Y_1, Y_2) = \left(X_1 + X_2, \frac{X_1}{X_2}\right)$ . Teremos então que:  $y_1 = g_1(x_1, x_2) = x_1 + x_2$  e  $y_2 = g_2(x_1, x_2) = \frac{x_1}{x_2}$ . Temos assim os valores dos  $y$ 's em termos dos  $x$ 's, e desejamos encontrar o contrário:

$$y_1 = x_1 + x_2 \Rightarrow x_1 = y_1 - x_2$$

$$y_2 = \frac{y_1 - x_2}{x_2} \Rightarrow x_2 = \frac{y_1}{y_2 + 1} \Rightarrow x_1 = \frac{y_1 y_2}{y_2 + 1}$$

Agora que temos os valores de  $X_1$  e  $X_2$  em função de  $Y_1$  e  $Y_2$ . Agora, podemos calcular as derivadas parciais de  $x$  com relação a  $y$ :

$$\frac{\partial x_1}{\partial y_1} = y_2(y_2 + 1)^{-1}$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial y_2} = y_1(y_2 + 1)^{-2}$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial y_1} = (y_2 + 1)^{-1}$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial y_2} = -y_1(y_2 + 1)^{-2}$$

Definimos agora o Jacobiano:

$$J(\underline{x}, \underline{y}) = \det \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial y_1} & \frac{\partial x_1}{\partial y_2} & \cdots & \frac{\partial x_1}{\partial y_n} \\ \frac{\partial x_2}{\partial y_1} & \frac{\partial x_2}{\partial y_2} & \cdots & \frac{\partial x_2}{\partial y_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x_n}{\partial y_1} & \frac{\partial x_n}{\partial y_2} & \cdots & \frac{\partial x_n}{\partial y_n} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Dessa forma, o Jacobiano da transformação será:

$$\begin{aligned} J(\underline{x}, \underline{y}) &= \det \begin{bmatrix} y_2(y_2 + 1)^{-1} & y_1(y_2 + 1)^{-2} \\ (y_2 + 1)^{-1} & -y_1(y_2 + 1)^{-2} \end{bmatrix} \\ &= [y_2(y_2 + 1)^{-1}] \cdot [-y_1(y_2 + 1)^{-2}] - [y_1(y_2 + 1)^{-2}] \cdot [(y_2 + 1)^{-1}] \\ &= -y_1(y_2 + 1)^{-2} \end{aligned}$$

Pelo teorema do Jacobiano, temos que:

$$\int \cdots \int_A f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \cdots dx_n = \int \cdots \int_{g(A)} f(h_1(y_1, \dots, y_n), \dots, h_n(y_1, \dots, y_n)) |J(\underline{x}, \underline{y})| dy_1 \cdots dy_n$$

Se  $f$  é integrável em  $A$ , com  $A \subseteq G_0$  e  $h = g^{-1}$ . Assim, usando os valores do exemplo 3.12, temos que  $X_1 \sim \exp(1)$ ,  $X_2 \sim \exp(1)$ ,  $X_1 \perp X_2$ , com densidade conjunta dada por  $f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = e^{-x_1 - x_2}$ , de modo que:

$$\begin{aligned} f(h_1(y_1, y_2), h_2(y_1, y_2)) |J(\underline{x}, \underline{y})| &= f\left(\frac{y_1 y_2}{y_2 + 1}, \frac{y_1}{y_2 + 1}\right) | -y_1(y_2 + 1)^{-2} | \\ &= \exp\left(-\left[\frac{y_1 y_2}{y_2 + 1} + \frac{y_1}{y_2 + 1}\right]\right) y_1(y_2 + 1)^{-2} \\ &= e^{-y_1} y_1(y_2 + 1)^{-2} \end{aligned}$$

Que é a mesma densidade conjunta encontrada para  $Z$  e  $W$  no exemplo 3.12.

### 3.8.1 Notas

1. Sendo  $f$  a densidade de  $X_1, \dots, X_n$  e  $P((X_1, \dots, X_n) \in G_0) = 1$ , se  $Y_i = g_i(x_1, \dots, x_n); i = 1, \dots, n$ , e  $\mathcal{B} \subseteq G$ , com  $\mathcal{B}$  boreliano. Então:

$$\begin{aligned} P((Y_1, \dots, Y_n) \in \mathcal{B}) &= P((X_1, \dots, X_n) \in h(\mathcal{B})) \\ &= \int \cdots \int_{h(\mathcal{B})} f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \cdots dx_n \\ &= \int \cdots \int_{\mathcal{B}} f(h_1(x_1, \dots, x_n), \dots, h_n(x_1, \dots, x_n)) |J(\underline{x}, \underline{y})| dy_1 \cdots dy_n \end{aligned}$$

2.  $P((Y_1, \dots, Y_n) \in G) = P((X_1, \dots, X_n) \in h(G)) = P((X_1, \dots, X_n) \in G_0) = 1$ . De modo análogo:

$$\begin{aligned} P((Y_1, \dots, Y_n) \in \mathcal{B}) &= P((Y_1, \dots, Y_n) \in \mathcal{B} \cap G) \\ &= \int \cdots \int_{\mathcal{B} \cap G} f(h(y)) |J(\underline{x}, \underline{y})| dy_1 \cdots dy_n \end{aligned}$$

**Theorem 3.3.** Sob as condições impostas no início da seção, a densidade conjunta de  $(Y_1, \dots, Y_n)$  é dada por:

$$f_{Y_1, \dots, Y_n} = \begin{cases} f_X(h_1(y_1, \dots, y_n), \dots, h_n(y_1, \dots, y_n)) |J(\underline{x}, \underline{y})| & , y \in G \\ 0 & , c.c. \end{cases}$$

### 3.8.2 Propriedades do Jacobiano

Podemos inverter a ordem das variáveis no Jacobiano, seguindo a seguinte propriedade:

$$J(\underline{x}, \underline{y}) = (J(\underline{y}, \underline{x}))^{-1} \Big|_{\underline{x}=h(\underline{y})} \quad (26)$$

**Example 3.14.** Retornando ao problema apresentado no exemplo 3.12:

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1 + x_2 & y_2 &= x_1 x_2^{-1} \\ \frac{\partial y_1}{\partial x_1} &= 1 & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} &= 1 \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} &= x_2^{-1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} &= -x_1 (x_2)^{-2} \end{aligned}$$

De modo que podemos agora encontrar o Jacobiano com relação aos valores das derivadas parciais dos  $y$ 's, e invertê-lo para encontrar o Jacobiano dos  $x$ 's:

$$\begin{aligned} J(\underline{y}, \underline{x}) &= \det \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ x_2^{-1} & -x_1 (x_2)^{-2} \end{bmatrix} = (x_2)^{-2} (x_2 + x_1) (-1) \\ &= \left( \frac{y_2 + 1}{y_1} \right)^2 \left( \frac{y_1}{y_2 + 1} + \frac{y_1 y_2}{y_2 + 1} \right) (-1) \\ &= \frac{(y_2 + 1)^2}{(y_1)^2} \frac{y_1 (y_2 + 1)}{y_2 + 1} (-1) \\ &= -\frac{(y_2 + 1)^2}{y_1} = -y_1^{-1} (y_2 + 1)^2 = \frac{1}{J(\underline{x}, \underline{y})} \end{aligned}$$

Temos que, se  $g : G_0 \rightarrow G$ , com  $G_0, G \subseteq \mathbb{R}^n$  abertos, se  $g(x_1, \dots, x_n) = (y_1, \dots, y_n)$ , então  $g$  é bijetiva e  $h = g^{-1}$ .

**Example 3.15.** Seja  $X \sim U(0, 1)$  e  $Y = -\ln(X)$ . Temos que  $G_0 = (0, 1)$ , e  $g(x) = -\ln(x)$ , de modo que  $G = (0, \infty)$ . Então:

$$\begin{aligned} g^{-1}(y) &= h(y) = \exp(-y) = e^{-y} \\ \frac{\partial}{\partial y}(g^{-1}(y)) &= -e^{-y} = J(x, y) \end{aligned}$$

Assim, para encontrar  $P(Y \leq y)$ , teremos:

$$\begin{aligned} P(Y \leq y) &= P(-\ln(X) \leq y) \\ &= P(\ln(X) \geq -y) \\ &= P(X \geq e^{-y}) \\ &= 1 - P(X \leq e^{-y}) \\ &= 1 - e^{-y} = F_Y(y) \implies f_Y(y) = e^{-y} \end{aligned}$$

Pelo Jacobiano, teremos:

$$f_Y(y) = f_X(h(y)) \cdot |J| = 1 \cdot e^{-y}$$

**Theorem 3.4.** Sejam  $G_1, G_2, \dots, G_k$  disjuntos tais que  $P\left(\underline{X} \in \bigcup_{i=1}^k G_i\right) = 1$ , tal que  $g|_{G_l}$  é 1:1 para todo  $l = 1, \dots, k$ . Denotamos por  $h^{(l)}$  a inversa de  $g$  em  $G_l$ , e definimos assim o Jacobiano local  $J_l(\underline{x}, \underline{y})$  como:

$$f_Y(y) = \begin{cases} \sum_{l=1}^k f(h^{(l)}(y)) |J_l(x, y)| & ; y \in G_l \\ 0 & c.c. \end{cases}$$

**Example 3.16.** Sejam  $X \sim N(0, 1)$  e  $Y = X^2$ . Sabemos que  $y = x^2$  não é bijetiva, mas podemos considerar a seguinte partição em que essa função seja localmente bijetiva:  $G_1 = (-\infty, 0)$  e  $G_2 = (0, \infty)$ . Então, em  $G_1, h^{(1)}(y) = -\sqrt{y}$ , e em  $G_2, h^{(2)}(y) = \sqrt{y}$ , de modo que os jacobianos locais serão:

$$J_1(x, y) = \frac{\partial}{\partial y} h^{(1)}(y) = -\frac{1}{2\sqrt{y}}$$

$$J_2(x, y) = \frac{\partial}{\partial y} h^{(2)}(y) = \frac{1}{2\sqrt{y}}$$

Assim, a densidade de  $Y$  será dada por:

$$\begin{aligned} f_Y(y) &= f_X(h^{(1)}(y)) |J_1(x, y)| + f_X(h^{(2)}(y)) |J_2(x, y)| \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}y\right) \frac{1}{2\sqrt{y}} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}y\right) \frac{1}{2\sqrt{y}} \\ &= \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} y^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{2}y} & , y > 0 \\ 0 & , c.c. \end{cases} \end{aligned}$$

Ou seja,  $Y \sim \text{Gama}\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$ , ou  $Y \sim \chi^2(1)$ .

**Notas:**

- Se  $X_1, \dots, X_n$  são iid, com  $X_i \sim N(0, 1) \Rightarrow X_1^2 + \dots + X_n^2 \sim \chi^2(n)$ ;
- Se  $X \sim N(0, 1), Y \sim \chi^2(n)$ , com  $X \perp Y \Rightarrow \frac{x}{\sqrt{y/n}} \sim t(n)$ ;
- Sejam  $X_1, \dots, X_n$ , iid, com  $X_i \sim N(0, 1)$ , com  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ :
  1.  $\frac{\bar{x}\sqrt{n}}{\sigma} \sim N(0, 1)$ ;
  2.  $\frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-1)$ ;
  3.  $\frac{\bar{x}\sqrt{n}}{s} \sim t(n-1)$ ;
  4.  $\bar{x} \perp s^2$ .
- Se  $X \sim \chi^2(k), Y \sim \chi^2(n), X \perp Y \Rightarrow \frac{X/k}{Y/n} \sim F(k, n)$ ;
- Se  $T \sim t(n) \Rightarrow T^2 \sim F(1, n)$ .

### 3.9 Exercícios

TODO