Matemática atuarial

Introdução

Danilo Machado Pires
danilo.pires@unifal-mg.edu.br

Universidade Federal de Alfenas

https://atuaria.github.io/portalhalley/

Matemática atuarial é um ramo da **matemática** que lida com avaliação de riscos de prêmios e reservas em relação às operações de seguros...no ramo vida*.

Revisão de probabilidade

- Fenômeno/ Experimento aleatório
- Espaço amostral
- Variáveis aleatórias Discretas/Contínuas
- Esperança/Variância de variáveis aleatórias

Revisão de Juros

- Juros Simples e Composto
- Diferentes taxas de juros
- Valor presente/Valor futuro
- Depósitos em série
- Fluxo de caixa

- **Seguros de vida**
  - Tempo Discreto/ Contínuo
  - Cobertura vitalícia/ temporária
  - Efeito imediato/ diferido
  - Seguro dotal puro/ misto
  - Relações entre seguros
- **Anuidades (planos de renda)**
  - Cobertura vitalícia/ temporária
  - Fluxos de caixa antecipado/ postecipado
  - Efeito imediato/ diferido
  - Fracionadas /Contínuas

- **Comutação**
  - Funções de comutação
  - Prêmio puro único para planos de seguro de vida
  - Prêmio puro único para planos baseados na sobrevivência
- **Prêmios e Benefícios**
  - Prêmio carregado
- **Reservas**
  - Método retrospectivo
  - Método prospectivo

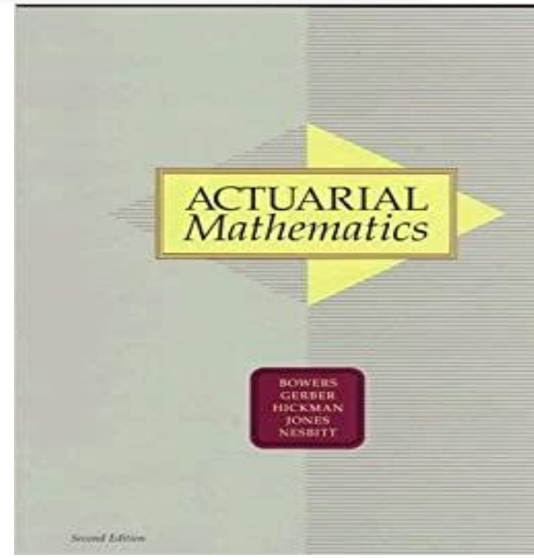
Matemática atuarial ramo vida

- Seguros de vida
  - Garante ao beneficiário um capital ou renda determinada no caso de morte (invalidez permanente)
  - Refletem uma característica única nos seres humanos.

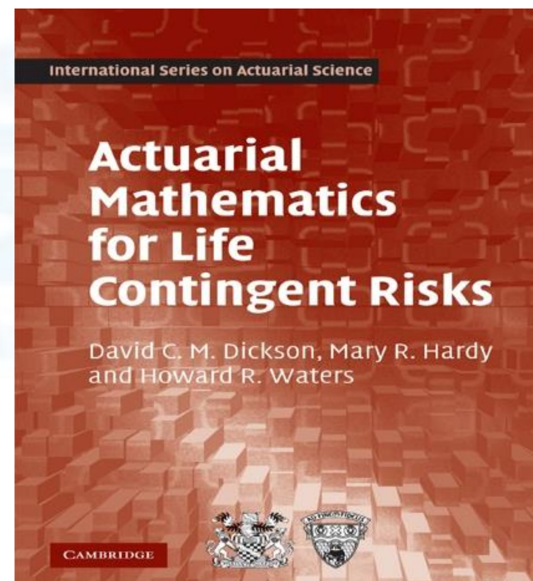
- $A_{x^1:\overline{n|}}$
- $\bar{A}_{x^1:\overline{n|}}$
- A_x
- $\bar{A}_x$
- $A_{x:\overline{n|}^1}$
- $\bar{A}_{x:\overline{n|}}$
- $A_{x:\overline{n|}}$
- ${}_{m|}A_x$
- ${}_{m|}\bar{A}_x$
- ${}_{m|}A_{x^1:\overline{n|}}$
- ${}_{m|}A_{x:\overline{n|}^1}$
- $\ddot{a}_x$
- a_x
- $\ddot{a}_{x:\overline{n|}}$
- $a_{x:\overline{n|}}$
- ${}_{m|}\ddot{a}_x$
- ${}_{m|}a_x$
- ${}_{m|}\ddot{a}_{x:\overline{n|}}$
- ${}_{m|}a_{x:\overline{n|}}$
- $\ddot{a}_x^{(m)}$
- $a_x^{(m)}$
- ${}_{k|}\ddot{a}_x^{(m)}$
- ${}_{k|}a_x^{(m)}$
- $\bar{a}_x$

Bibliografia

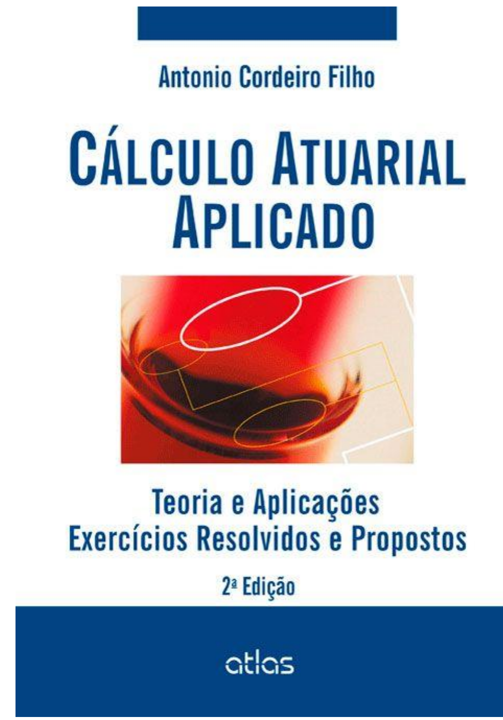
BOWERS, N. et al. **Actuarial mathematics. 2. ed.** Ilinois: The Society Of Actuaries, 1997.



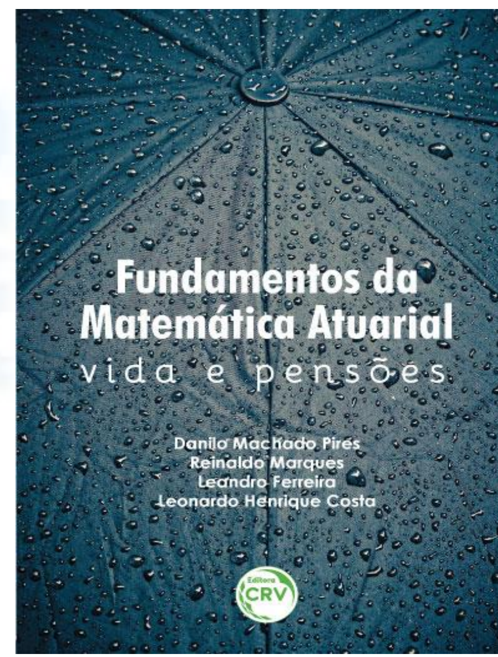
D. C. M. Dickson, M. R. Hardy and H. R. Waters. **Actuarial Mathematics for Life Contingent Risks.** Cambridge University Press, Cambridge, 2013.



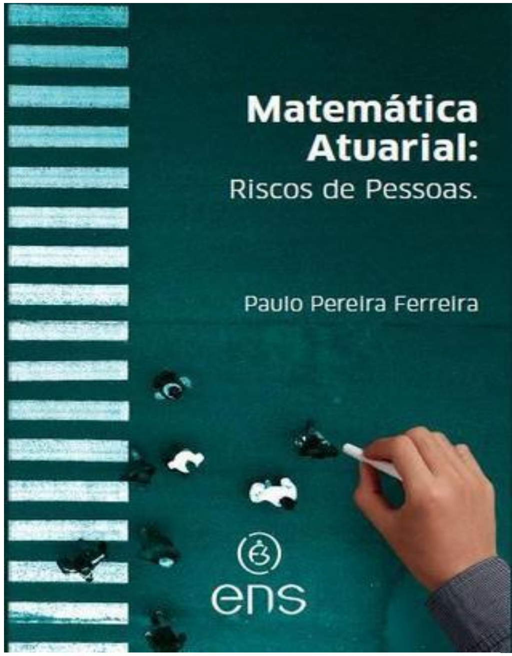
CORDEIRO FILHO, Antônio. **Cálculo Atuarial Aplicado: teoria e aplicações, exercícios resolvidos e propostos.** São Paulo: Atlas, 2009.



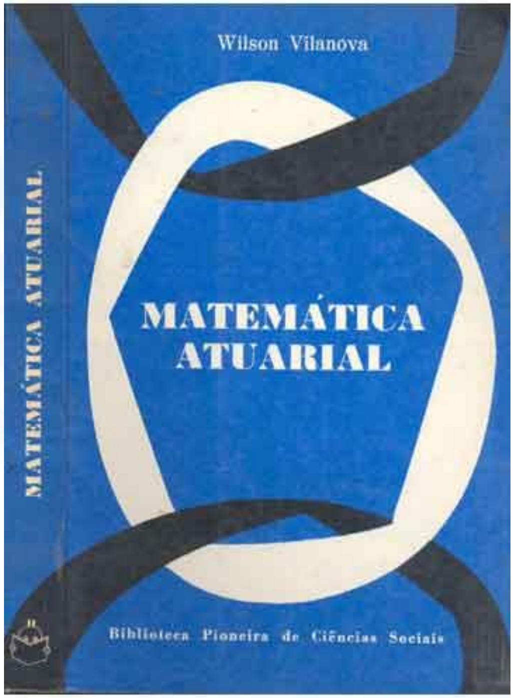
PIRES,M.D.;COSTA,L.H.;FERREIRA,L.;MARQUES,R. **Fundamentos da matemática atuarial: vida e pensões**.Curitiba:CRV,2022.



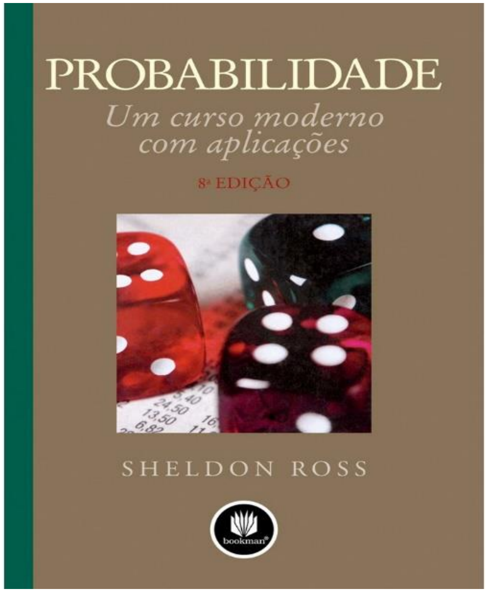
FERREIRA, P. P. **Matemática Atuarial: Riscos de Pessoas.** Rio de Janeiro: ENS, 2019.



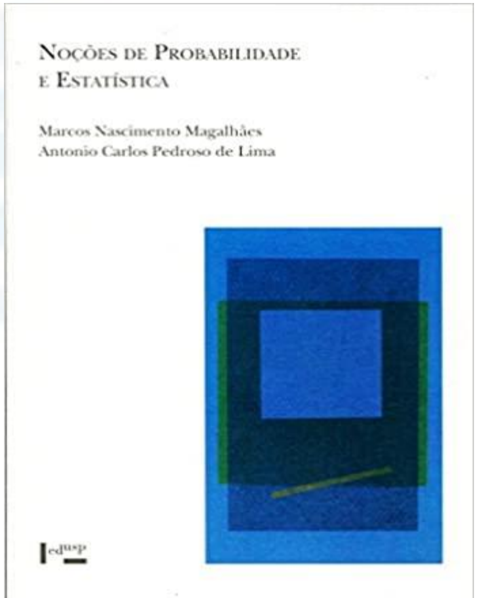
VILANOVA, Wilson. **Matemática atuarial: destinado aos cursos de ciências econômicas, contábeis e atuariais.** Liv. Pioneira, Ed. da Universidade, 1969.



JAMES,B. R.; Probabilidade: **Um Curso em níve intermediário**, IMPA, Rio de Janeiro, 3 ed., 2004.



Magalhães, M. N. Lima, A. C. P. **Noções de Probabilidade e Estatística,** Editora USP: São Paulo, 2001.



Matemática atuarial

Aula 1-Revisão de Probabilidade

Danilo Machado Pires
danilo.pires@unifal-mg.edu.br

Universidade Federal de Alfenas

https://atuaria.github.io/portalhalley/

Revisão de probabilidade

- A ciência busca coletar informações na natureza e formular modelo ... que expliquem parte dos fenômenos ou permitam a sua previsão.

- Método científico,
  - Conjunto de regras para obtenção do conhecimento durante a investigação científica...

  - As hipóteses formuladas são verificadas posteriormente, com a coleta e interpretação de dados.

- Modelo e realidade por vezes são erroneamente confundidos.

Revisão de probabilidade

- Por melhor que seja um modelo, ele sempre contará com incerteza.

- Modelos determinísticos
  - Condições bastante controladas,
  - Variações desprezadas

- Modelos probabilísticos
  - Controle total e inviabilizado
  - Variações não podem ser ignoradas.

Revisão de probabilidade

- **Fenômeno aleatório** é todo aquele que quando observado repetidamente sob as mesmas condições produz resultados diferentes.

  - Quando a repetição do fenômeno é controlada pelo experimentador, é dito ser um **experimento probabilístico.**

Revisão de probabilidade

- **Espaço amostral** ($\boldsymbol{\Omega}$) é o conjunto de todos os possíveis resultados de um fenômeno aleatório.

- **Definição** Seja Ω o espaço amostral do experimento. Todo subconjunto $A \subset \Omega$ será chamado evento.
  - Ω é o evento certo,
  - $\emptyset$ o evento impossível.
  - Se $\omega \subset \Omega$, o evento $\{\omega\}$ é dito elementar (ou simples).

Revisão de probabilidade

EXEMPLO 1: Defina os seguintes espaços amostrais.

1) Jogar um dado

$$\Omega = \{ \quad \}$$

2) Altura dos alunos da Unifal

$$\Omega = \{ \quad \}$$

3) Tempo de vida restante de uma pessoa

$$\Omega = \{ \quad \}$$

Revisão de probabilidade

1) Jogar um dado

$$\Omega = \{1,2,3,4,5,6\}$$

2) Altura dos alunos da Unifal

$$\Omega = \{x \in \mathbb{R}: 1{,}5 \leq x \leq 2\} *$$

3) Tempo de vida restante de uma pessoa

$$\Omega = \{t \in \mathbb{R}: 0 \leq t\}$$

Revisão de probabilidade

1) Jogar um dado

$$\Omega = \{1,2,3,4,5,6\}$$
$$\boldsymbol{A = \{1, 3, 5\}}$$

2) Altura dos alunos da Unifal

$$\Omega = \{x \in \mathbb{R}: 1,5 \leq x \leq 2\}$$
$$\boldsymbol{A = \{1,6 \leq x \leq 1,7\}}$$

3) Tempo de vida restante de uma pessoa

$$\Omega = \{t \in \mathbb{R}: t \geq 0\}$$
$$\boldsymbol{A = \{0 \leq t \leq 30\}}$$

Um evento ao qual atribuímos uma probabilidade é chamado evento aleatório.

Conceitos de Probabilidade

- Teoria clássica

Dado o espaço de resultados Ω, constituído por um número finito de n elementos igualmente prováveis, ..., define-se a probabilidade de acontecimento de A, como sendo a razão de resultados favoráveis A e o número de resultados possíveis.

$$P(A) = \frac{n° de\ resultados\ de\ A}{n°\ de\ resultados\ possíveis}$$

...se conhece fatos decisivos sobre o mecanismo ou processo que produz os resultados

Conceitos de Probabilidade

- Teoria Frequentista
  - Na observação de um certo fenômeno através de um experimento, a probabilidade de um certo evento A é definida como a sua frequência observada, à medida que o número de ensaios tende para o infinito.

$$P(A) = \lim_{n \to \infty} \frac{n_A}{n}$$

em que n_A é o número de ensaios em que o evento A foi observado, e n o número total de ensaios. À medida que o número de repetições da experiência aleatória aumenta, a frequência relativa com quer se realiza o evento A tende a estabilizar para um valor entre 0 e 1.

Conceitos de Probabilidade

- Probabilidade subjetiva e lógica

    - Define-se como uma medida do grau de confiança em relação a uma proposição.
    - Ela é função da quantidade de informação disponível ...
    - Julgamento pessoal .
    - Pensamento *Bayesiano*.
    - Possui a restrição de que deve obedecer a critérios de consistência, obedecendo aos axiomas de probabilidade.

Conceitos de Probabilidade

- Probabilidade clássica
- Probabilidade Frequentista
- Probabilidade subjetiva e lógica
- *Probabilidade Geométrica*
- *Probabilidade de Shannon*
- *Probabilidades de Conjuntos Difusos*
- ...

Revisão de probabilidade

- Definição formal de probabilidade

Seja o espaço amostral Ω um conjunto não vazio. Uma probabilidade em Ω é uma função de conjunto $P(\ )$ que associa a subconjuntos A de Ω um número real $P(A)$ que satisfaz os axiomas a seguir.

- Para todo $A \subseteq \Omega$, $0 \leq P(A) \leq 1$;

- $P(\Omega) = 1$;

- Se $A_1, A_2, \ldots, A_n$ forem, dois a dois, eventualmente excludentes (disjuntos), então:

$$P(\cup_{i=1}^{\infty} A_i) = \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i)$$

Revisão de probabilidade

- Na realização de um fenômeno aleatório, é comum termos interesse em uma ou mais quantidades.
  - Essas quantidades são funções das ocorrências do fenômeno.

- Variável aleatória: é uma função que associa a cada elemento de Ω um número real.

EXEMPLO 2: Sabe-se que em uma fábrica 25% dos itens produzidos apresentam algum problema de fabricação:

Itens defeituosos $\left(D \rightarrow P(D) = \frac{1}{4}\right)$

Itens perfeitos $\left(Pe \rightarrow P(Pe) = \frac{3}{4}\right)$

Revisão de probabilidade

Para uma amostra $n = 2$ peças retiradas é possível construir uma tabela onde X é o número de peças defeituosas que pode ocorrer e $P(X)$ será a probabilidade do resultado.

X	0	1	2
	(Pe, Pe)	$(D, Pe)(Pe, D)$	(D, D)
$P(X)$	$\frac{3}{4} \times \frac{3}{4} = \frac{9}{16}$	$\left(\frac{1}{4} \times \frac{3}{4}\right) + \left(\frac{3}{4} \times \frac{1}{4}\right) = \frac{6}{16}$	$\left(\frac{1}{4} \times \frac{1}{4}\right) = \frac{1}{16}$

Revisão de probabilidade

➢ Variáveis Aleatórias Discretas

- $P(X = x)$ Função de probabilidade.
- $0 \leq P(X = x_i) \leq 1$ para todo i.
- $\sum_{i=1}^{\infty} P(X = x_i) = 1$

Conjunto enumerável: Quando é finito ou quando existe uma bijeção com os números naturais.

Ex.: $f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$, tal que:

$$f(x) = \begin{cases} 2x - 1, se\ x > 0 \\ -2x, se\ x \leq 0 \end{cases}$$

Para $x \in \mathbb{Z}$

Revisão de probabilidade

É um tipo de variável aleatória que pode assumir um número infinito de valores dentro de um intervalo contínuo

➢ <u>Variáveis aleatórias contínuas</u>

- $f(x)$ Função de densidade *(f.d.p)*
- $f(x) \geq 0$ para qualquer valor de x
- $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$
- $P(a \leq X \leq b) = \int_{a}^{b} f(x)dx$

Revisão de probabilidade

➢ Variáveis Aleatórias Discretas

- $P(X = x)$ Função de probabilidade.
- $0 \leq P(X = x_i) \leq 1$ para todo i.
- $\sum_{i=1}^{\infty} P(X = x_i) = 1$

➢ Variáveis aleatórias contínuas

- $f(x)$ Função de densidade *(f.d.p)*
- $f(x) \geq 0$ para qualquer valor de x
- $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$
- $P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx$

Revisão de probabilidade

- Função de distribuição de probabilidade (função de distribuição).

Em geral ela é representada por $F_X(x)$.

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^{x} f_X(z)dz$$

$$F_X(x_k) = P(X \leq x_k) = \sum_{i=0}^{k} P(X = x_i)$$

Revisão de probabilidade

EXEMPLO 3:

a)

X	1	2	3	4
$P(X)$	0,1	0,2	0,3	0,4

b)

$$P(X=x)=\begin{cases}0{,}6 & se\ x=0\\ 0{,}4 & se\ x=1\\ 0, & c.c.\end{cases}$$

c)

$$P(X=x)=\begin{cases}0{,}7 & se\ x=0\\ 0{,}5 & se\ x=1\\ 0, & c.c.\end{cases}$$

d)

$$f(x)=\begin{cases}\frac{6}{5}(x^2+x) & se\ 0\le x\le 1\\ 0 & c.c.\end{cases}$$

e)

$$f(x)=2e^{-2x}, \qquad se\ x\ge 0$$

f)

$$f(x)=\begin{cases}\frac{1}{10}x+\frac{1}{10}, & se\ 0\le x\le 2\\ -\frac{3}{40}x+\frac{9}{20}, & se\ 2< x\le 6\\ 0, & c.c.\end{cases}$$

d)

$$f(x) = \begin{cases} \frac{6}{5}(x^2+x) & se\ 0 \le x \le 1 \\ 0 & c.c. \end{cases}$$

$$\int_0^1 \frac{6}{5}(x^2+x)dx = \frac{6}{5}\left(\frac{x^3}{3}+\frac{x^2}{2}\right)\Bigg|_0^1$$

$$\int_0^1 \frac{6}{5}(x^2+x)dx = \frac{6}{5}\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{2}\right)-\frac{6}{5}\left(\frac{0}{3}+\frac{0}{2}\right)=\frac{6}{5}\left(\frac{5}{6}\right)=1$$

e)

$$f(x) = 2e^{-2x}, \qquad se\ x \ge 0$$

$$\int_0^\infty 2e^{-2x}dx = -e^{-2x}\Big|_{x=0}^{x\to\infty}$$

$$\int_0^\infty 2e^{-2x}dx = \lim_{x\to\infty} -\frac{1}{e^{2x}} - \left(-\frac{1}{e^{2\times 0}}\right) = 1$$

f)

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{10}x+\frac{1}{10}, & se\ 0 \le x \le 2 \\ -\frac{3}{40}x+\frac{9}{20}, & se\ 2 < x \le 6 \\ 0, & c.c. \end{cases}$$

$$\int_0^2 \frac{1}{10}x+\frac{1}{10}dx + \int_2^6 -\frac{3}{40}x+\frac{9}{20}dx$$

$$\frac{x^2}{20}+\frac{x}{10}\Bigg|_{x=0}^{x=2} + \left(-\frac{3x^2}{80}+\frac{9x}{20}\right)\Bigg|_{x=2}^{x=6}$$

$$\frac{2}{5}+\frac{3}{5}=1$$

Esperança de variáveis aleatórias

- ...forma de avaliar ganhos em jogos com apostas a dinheiro.

- Representa o ponto de equilíbrio da distribuição de seus valores.

- ...parâmetro para vários modelos probabilísticos.

Esperança de variáveis aleatórias

- Variáveis aleatórias discretas

$$E(X) = \sum_i x_i P(X = x_i) = \mu_X$$

- Variáveis aleatórias Contínuas

$$E(X) = \int x f(x) dx = \mu_X$$

Esperança de variáveis aleatórias

- Seja X uma variável aleatória e g é uma função, ambos com domínio e contradomínio real. O valor esperado do valor da função $g(X)$ denotado por $E[g(X)]$ é definido por:

$$E[g(X)] = \int g(x) f_X(x) dx$$

$$E[g(X)] = \sum_i g(x_i) P(X = x_i)$$

Exemplo 4 Segundo determinada tábua de vida, o tempo de vida adicional de uma pessoa de 106 é modelado por:

T	0	1	2	3
$P(T)$	0,67514	0,195183	0,1219955	0,0076815

a) A expectativa de vida para uma pessoa dessa idade é?

b) Seja $g(T) = v^{T+1}$ calcule $E[g(T)]$, em que $v = \left(\frac{1}{1{,}03}\right)$.

Exemplo 4: Segundo determinada tábua de vida o tempo de vida adicional de uma pessoa de 106 é modelado por:

T	0	1	2	3
$P(T)$	0,67514	0,195183	0,1219955	0,0076815

Solução

a) A expectativa de vida para uma pessoa dessa idade é?

$$E(T) = \sum tP(T = t) = 0{,}4622$$

b) Seja $g(T) = v^{T+1}$ calcule $E[g(T)]$, em que $v = \left(\frac{1}{1{,}03}\right)$.

$$E[g(T)] = E(v^{T+1}) = \sum v^{t+1}P(T = t) = 0{,}9866602$$

Esperança de variáveis aleatórias

Seja L um valor limite dentro do domínio de X, e seja Y uma variável aleatória " Valor de X sujeito ao limite L". Então:

$$Y = \begin{cases} X, & X < L \\ L, & X \geq L \end{cases}$$

Logo, para o caso de X se contínuo tem-se que:

$$E(Y) = E(X; L) = \int_{-\infty}^{L} x f_X(x) dx + \int_{L}^{\infty} L f_X(x) dx = \int_{-\infty}^{L} x f_X(x) dx + L\, S_X(L)$$

E no caso de X se discreto, tem-se:

$$E(Y) = E(X; L) = \sum_{i=0}^{x_i < L} x_i P_X(x_i) + \sum_{x_i = L}^{\infty} L P_X(x_i) = \sum_{i=0}^{x_i = L} x_i P_X(x_i) + L\, P(X \geq L)$$

Exemplo 5 Segundo determinada tábua de vida o tempo de vida adicional de uma pessoa de 106 é modelado da seguinte forma:

T	0	1	2	3
$P(T)$	0,6751	0,195183	0,1219955	0,0076815

a) Determinado produto oferecido por uma seguradora tem um prêmio calculado a partir do valor esperado da variável aleatória $g(T) = v\frac{1-v^T}{1-v}$, em que $v = \frac{1}{1{,}03}$. A seguradora determina que irá cobrar dos seus segurados um prêmio baseado no valor esperado de $g(T)$, sujeito a um limite técnico $g(2)$. Calcule o prêmio sujeito a esse limite.

T	0	1	2	3
$P(T)$	0,67514	0,195183	0,1219955	0,0076815

Solução:

Seja Y, tal que:

$$Y = \begin{cases} g(T), & g(T) < g(2) \\ g(2), & g(T) \geq g(2) \end{cases}$$

Equivalente a

$$Y = \begin{cases} g(T), & T < 2 \\ g(2), & T \geq 2 \end{cases}$$

$$\Pi_Y = E(Y) = E[g(T); g(2)]$$

$$\Pi_Y = \sum_{t=0}^{1} g(t)\, P(T = t) + g(2) \sum_{t=2}^{3} P(T = t)$$

T	0	1	2	3
$P(T)$	0,67514	0,195183	0,1219955	0,0076815

Solução:

$$\Pi_Y = \sum_{t=0}^{1} g(t)\, P(T = t) + g(2) \sum_{t=2}^{3} P(T = t)$$

$$\Pi_Y = \sum_{t=0}^{1} v \frac{1 - v^t}{1 - v} P(T = t) + v \frac{1 - v^2}{1 - v} \sum_{t=2}^{3} P(T = t) \approx 0{,}4376311$$

- **Portal Halley :** https://atuaria.github.io/portalhalley/
- Bowers et al. **Actuarial Mathematics**, 2ª edição. SOA, 1997.
- D. C. M. Dickson, M. R. Hardy and H. R. Waters. **Actuarial Mathematics for Life Contingent Risks.** Cambridge University Press, 2019.
- CORDEIRO FILHO, Antônio. **Cálculo Atuarial Aplicado: teoria e aplicações, exercícios resolvidos e propostos.** São Paulo: Atlas, 2009.
- PIRES,M.D.;COSTA,L.H.;FERREIRA,L.;MARQUES,R. **Fundamentos da matemática atuarial: vida e pensões**. Curitiba :CRV,2022.