

# Teoria do Risco

## Aula 18

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

## O processo de Poisson Homogêneo para frequência de Sinistros

- Outra propriedade importante do processo de Poisson Homogêneo vem do fato de que sua intensidade ser constante no tempo, e isso permite que o tempo entre sinistros obedece uma distribuição exponencial.
- Considere a probabilidade de que não ocorra sinistros dentre de um intervalo  $t$ :

$$P(N_t = 0) = \frac{(\lambda t)^0 e^{-\lambda t}}{0!} = e^{-\lambda t}$$

## O processo de Poisson Homogêneo para frequência de Sinistros

- Ao se definir  $N_t$  e  $N_{t+s}$  como a frequência de sinistros ocorridos até os instantes  $t$  e  $t + s$ , tem-se:

$$P(N_{t+s} - N_t = 0) = P(N_s = 0) = \frac{(\lambda s)^0 e^{-\lambda s}}{0!}$$

- Esse resultado pode ser entendido como a probabilidade de espera entre um sinistro e outro (evento), neste caso, pode-se dizer que o tempo necessário para ocorrer um sinistro é maior que  $s$ .

## O processo de Poisson Homogêneo para frequência de Sinistros

- Ao se definir uma variável aleatória  $T$  como o intervalo de tempo entre dois sinistros, tem-se:

$$P(T > s) = P(N_s = 0) = P(N_{t+s} - N_t = 0) = \frac{(\lambda s)^0 e^{-\lambda s}}{0!} = e^{-\lambda s}$$

$$P(T > s) = e^{-\lambda s}$$

- A probabilidade de que o tempo entre dois sinistros seja menor que um intervalo  $s$ , implica que o número de sinistros ocorridos nesse intervalo é maior que 0.

$$P(T < s) = P(N_s > 0) = 1 - e^{-\lambda s}$$

Portanto  $T \sim \text{Exp}(\lambda)$ ,  $t > 0$  e  $\lambda > 0$ .

## O processo de Poisson Homogêneo para frequência de Sinistros

➤ Portanto ao se definir  $\{N_t, t \geq 0\}$  como um processo de Poisson homogêneo com intensidade  $\lambda$ , é estabelecido que o tempo entre dois sinistros,  $T$ , possui distribuição exponencial com parâmetro  $\lambda$ , logo:

$F_T(t) = 1 - e^{-t\lambda}$       Distribuição acumulada de  $T$ .

$\bar{F}_T(t) = e^{-t\lambda}$       Função de sobrevivência de  $T$  ( Excesso de Danos).

$f_T(t) = \lambda e^{-t\lambda}$       Função densidade de  $T$ .

$E(T) = \frac{1}{\lambda}$       Valor esperado de  $T$ .

$var(T) = \frac{1}{\lambda^2}$       Variância de  $T$ .

$M_T(r) = \frac{\lambda}{r-\lambda}$       Função geradora de momentos de  $T$ .

## O processo de Poisson Homogêneo para frequência de Sinistros

O fato da distribuição do tempo entre dois sinistros ser dado por um modelo de distribuição exponencial implica em dizer que:

- I) A probabilidade do tempo de espera entre dois sinistros decai exponencialmente com o passar do tempo.
- II) A variável aleatória que representa a soma de durações exponencialmente distribuídas (idênticas),  $S_n = \sum_{i=1}^n T_i$ , apresenta distribuição gama com parâmetros  $n$  e  $\lambda$ .

## O processo de Poisson Homogêneo para frequência de Sinistros

- III) A probabilidade de que seja necessário esperar mais  $s$  até que o evento aconteça, dado que esse evento não aconteceu antes de  $t$ , é a mesma de que esse evento ocorra depois dos  $s$  iniciais.

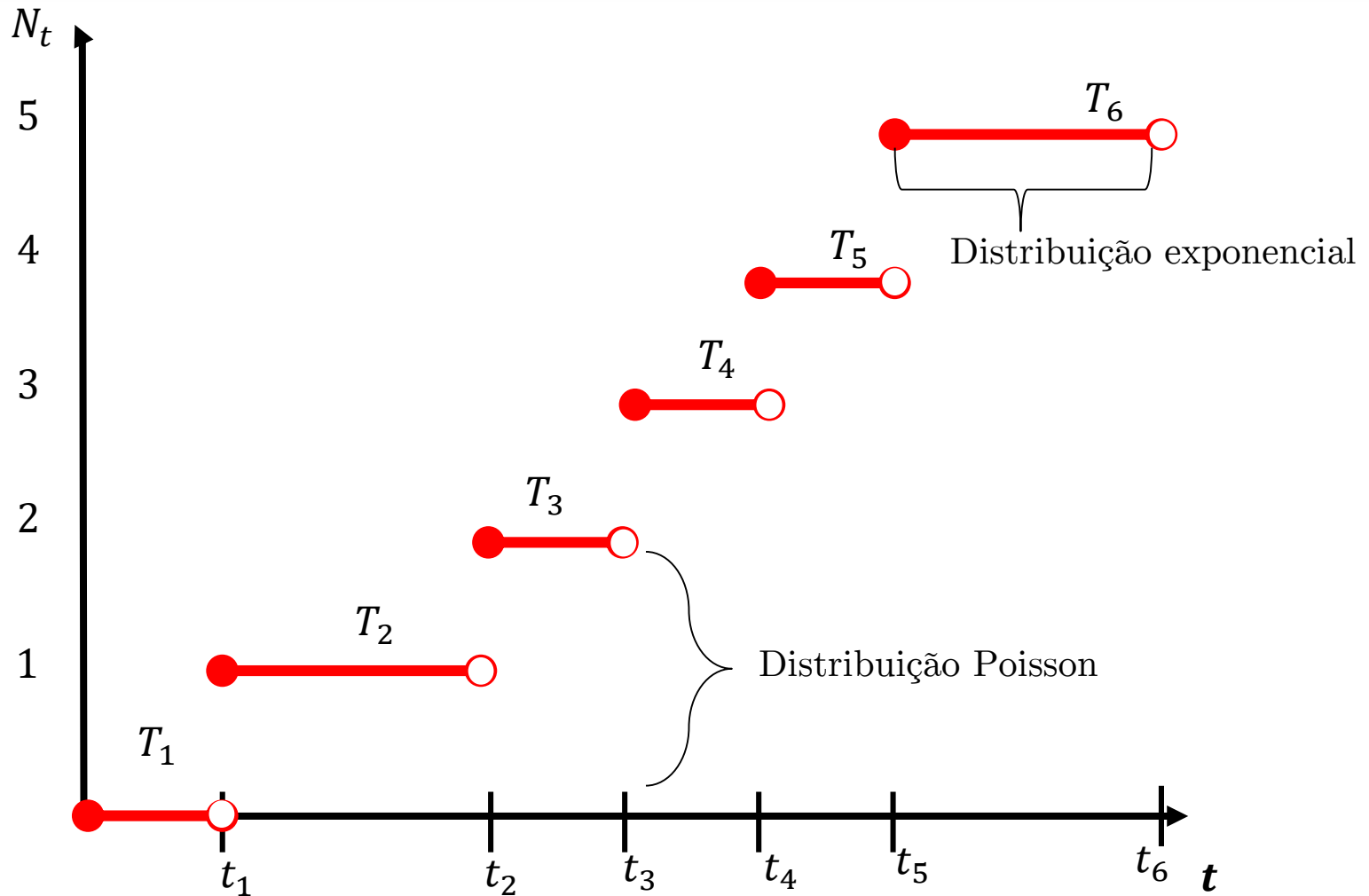
$$P(T > t + s | T > t) = P(T > s)$$

\*Propriedade da perda de memória: Dentre as distribuições contínuas, a exponencial é a única a possuir tal propriedade.

Consequentemente

$$E(T) = E(T | T > s)$$

# Processo de Contagem



- Para todo  $i \geq 1$ ,  $t_i$  é o instante da  $i$  - ésima indenização.
- $T_1 = t_1, T_2 = t_2 - t_1, \dots, T_n = t_n - t_{n-1}$  tempo entre as indenizações (iid.)
- Função média de um processo pontual  $\Lambda(t) = E(N_t) = \lambda t$ .



**EXEMPLO 1:** Denote por  $T$  como o tempo decorrido entre  $k - 1$  *ésimo* sinistro e do  $k$ -*ésimo* sinistro de uma carteira de seguros. Suponha que o tempo decorrido entre sinistros independentes e identicamente distribuídos tem a seguinte função densidade de probabilidade

$$f_T(t) = 0,04861e^{-0,04861t}, t > 0.$$

Em que  $t$  é mensurado em lapsos de meia hora. Sendo assim calcule a probabilidade de que pelo menos um sinistro será processado nas próximas duas horas e trinta minutos.

## SOLUÇÃO:

Uma vez que a distribuição do tempo decorrido entre dois sinistros é uma exponencial, logo:

$$\lambda = 0,04861.$$

Como a função densidade de probabilidade está descrita em duas horas e trinta minutos, então deve-se calcular a probabilidade considerando essa ordem de medida. Dessa forma:

$$P(N_5 \geq 1) = 1 - P(N_5 = 0)$$

$$P(N_5 \geq 1) = 1 - e^{-0,04861 \times 5} = 1 - e^{-0,24305} \approx 0,2157 \approx 21,57\%$$

**EXEMPLO 2:** Considere uma carteira em que a frequência histórica relativa de ocorrência anual de sinistros é de 5 sinistros por ano.

- a) Calcule a probabilidade de que o tempo de espera entre dois sinistros consecutivos seja maior que 8 meses.
- b) Calcule a probabilidade do intervalo entre dois sinistros ser superior a 10 meses, sabendo-se que nos 2 primeiros meses não ocorreram sinistros.

**EXEMPLO 2:** Considere uma carteira em que a frequência histórica relativa de ocorrência anual de sinistros é de 5 sinistros por ano.

a) Calcule a probabilidade de que o tempo de espera entre dois sinistros consecutivos seja maior que 8 meses.

$$\overline{F}_T\left(\frac{2}{3}\right) = e^{-5\left(\frac{2}{3}\right)} = 0,036$$

**EXEMPLO 2:** Calcule a probabilidade de que o tempo de espera entre dois sinistros consecutivos seja maior que 8 meses.

$$\overline{F}_T\left(\frac{2}{3}\right) = e^{-5\left(\frac{2}{3}\right)} = 0,036$$

b) Calcule a probabilidade do intervalo entre dois sinistros ser superior a 10 meses, sabendo-se que nos 2 primeiros meses não ocorreram sinistros.

$$10 \text{ meses} = \frac{5}{6} \text{ anos e } 2 \text{ meses} = \frac{1}{6} \text{ anos.}$$

$$P\left(T > \frac{5}{6} \middle| T > \frac{1}{6}\right) = \frac{e^{-5\left(\frac{5}{6}\right)}}{e^{-5\left(\frac{1}{6}\right)}} = e^{-5\left(\frac{2}{3}\right)} = 0,036 = \overline{F}_T\left(\frac{2}{3}\right)$$

## O processo de Poisson para frequência de Sinistros

- A generalização do processo de Poisson é chamada de processo de renovação.
- Se os tempos entre as falhas  $T_1, T_2, \dots$  são *iid*, então diz-se que o processo é de renovação,
  - ...não necessariamente a distribuição de  $T_i$  precisa ser exponencial.

## O processo de Poisson para frequência de Sinistros

- Os processos não homogêneos também apresentando muitas aplicações na análise de risco ( são processos mais gerais).
- Processos não Homogêneos (função intensidade não é constante)
  - Acarretando em uma não estacionaridade e/ou
  - não independência nos incrementos.
  - ...Processo misto (intensidade definida por uma variável aleatória)

## O processo de Poisson para frequência de Sinistros

Processo de Poisson misto de Pólya,

$$\Lambda \sim \text{Gama}(r, \alpha)$$

$$P(N_t = n) = \binom{n + \alpha - 1}{n} \left( \frac{t}{t + r} \right)^n \left( \frac{r}{t + r} \right)^\alpha$$

- “...não obedece ao critério de independência nos incrementos, de que modo que não deveria ser classificado como um processo de Poisson (contagem).”



# Processo estocástico de sinistros agregados

$$S_{ind.t} = X_{1.t} + X_{2.t} + X_{3.t} + \cdots + X_{n.t}$$

$$S_{Col.t} = \sum_{i=1}^{N_t} X_i$$

$\{N_t, t \geq 0\}$ : Processo de contagem (**Processo de Poisson**)

$\{S_{Col.t}, t \geq 0\}$ : Processo estocástico de sinistros agregados

$X_i$  : Representa a severidade do  $i$  — *ésimo* sinistro.

## Processo de Poisson para modelagem de Sinistros agregados

- Definindo-se  $S_{col.t}$  como a severidade acumulada no intervalo de tempo  $t$  de acordo como o modelo de risco agregado.

$$S_{col.t} = S_t$$

- O processo estocástico  $\{S_t, t > 0\}$  é dito ser um processo de **Poisson composto homogêneo** se podemos representá-lo da seguinte forma:

$$S_t = \sum_{i=1}^{N_t} X_i$$

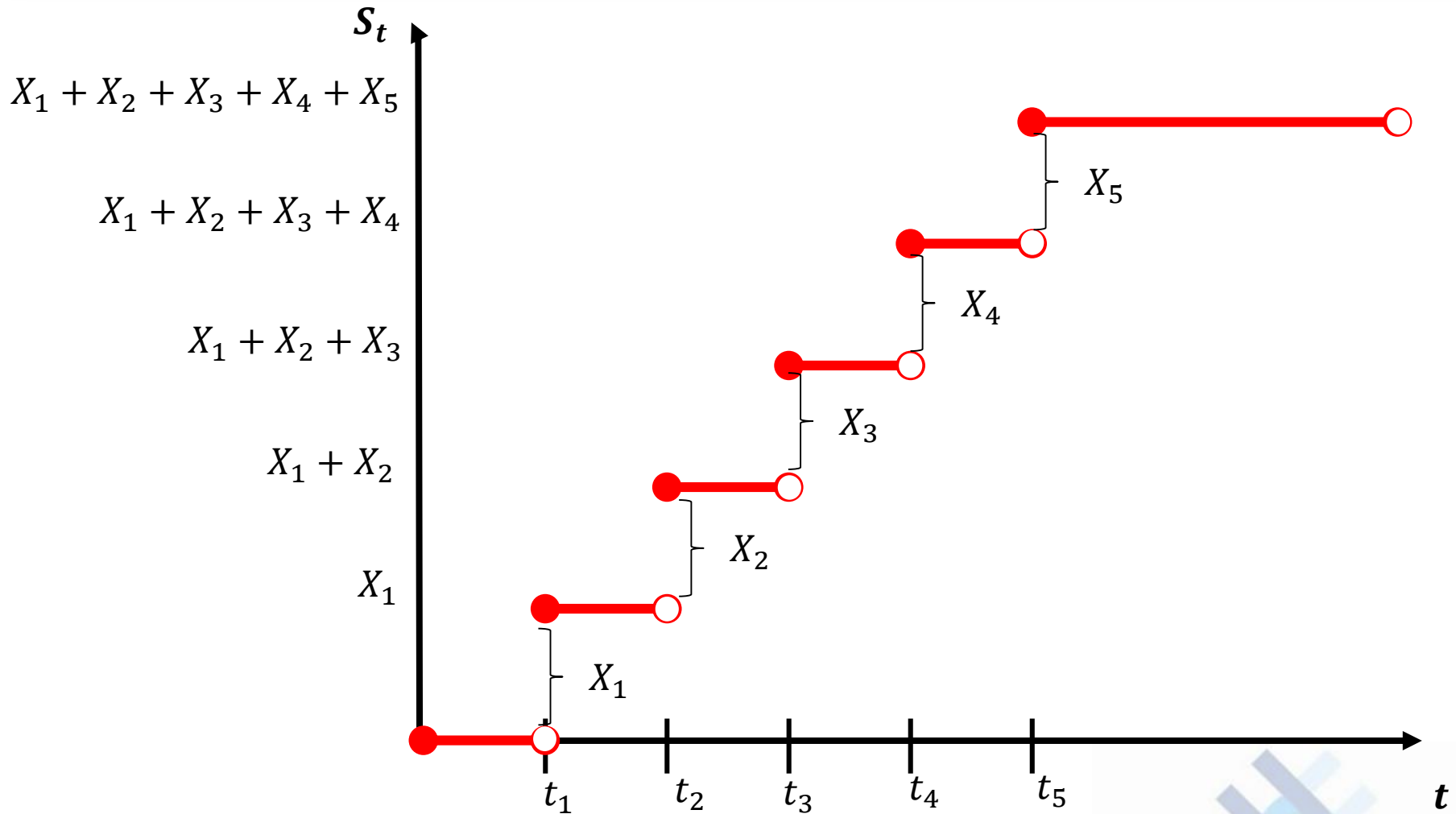
## Processo de Poisson para modelagem de Sinistros agregados

$\{N_t, t > 0\}$  é um processo de Poisson homogêneo.

$\{X_i, i > 0\}$  é uma sequência de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas e independentes de  $\{N_t, t > 0\}$ .

$$S_t = 0 \text{ se } N_t = 0$$

# Processo de Contagem



➤ Para todo  $i \geq 1$ ,  $t_i$  é o instante da  $i$  – ésima indenização.

## Processo de Poisson para modelagem de Sinistros agregados

A função distribuição convoluta de  $S_t$  é será dada por:

$$F_{S_t}(s) = \sum_{k=0}^{\infty} P^{*k}(s) \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

em que  $P^{*k}(s) = P(X_1 + X_2 + \cdots + X_k < s)$

Consequentemente temos que:

$$p_{S_t}(s) = \sum_{k=0}^{\infty} p^{*k}(s) \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

em que  $p^{*k}(s) = P(X_1 + X_2 + \cdots + X_k = s)$

## Processo de Poisson para modelagem de Sinistros agregados

- Sua esperança e variância são dadas por:

$$E(S_t) = \lambda t E(X)$$

$$\text{var}(S_t) = \lambda t E(X^2)$$

- Esperança matemática e variância do sinistro agregado para o intervalo de tempo  $t$  de um processo estocástico Poisson Homogêneo.

$$M_{S_t}(r) = e^{\lambda t [M_X(r) - 1]}$$

\*  $M_{S_t}(r)$  existe se  $M_X(r)$  existe.

**EXEMPLO 3:** Considere uma carteira de  $n$  apólices idênticas de seguros de danos em que a frequência histórica relativa de ocorrência de sinistros é de 5 sinistros por ano. Considere que a distribuição de probabilidades de severidades tem um comportamento descrito pela distribuição Gama com parâmetros  $\alpha = 100$  e  $\beta = 2$ ,  $X \sim Gama(100, 2)$ . Supondo que este comportamento se mantenha constante no período de análise e que todas as apólices são renovadas a cada ano. Obtenha a fórmula genérica da função geradora de momentos, esperança matemática e do desvio padrão da distribuição convoluta de sinistros agregados.

■ Resp.:

$$M_X(r) = \left(\frac{\beta}{\beta-r}\right)^\alpha \quad E(X) = \frac{\alpha}{\beta} \quad \text{var}(X) = \frac{\alpha}{\beta^2}$$

Logo,

$$M_{S_t}(r) = e^{\lambda t \left[ \left(\frac{\beta}{\beta-r}\right)^\alpha - 1 \right]} = e^{5t \left[ \left(\frac{2}{2-r}\right)^{100} - 1 \right]}$$

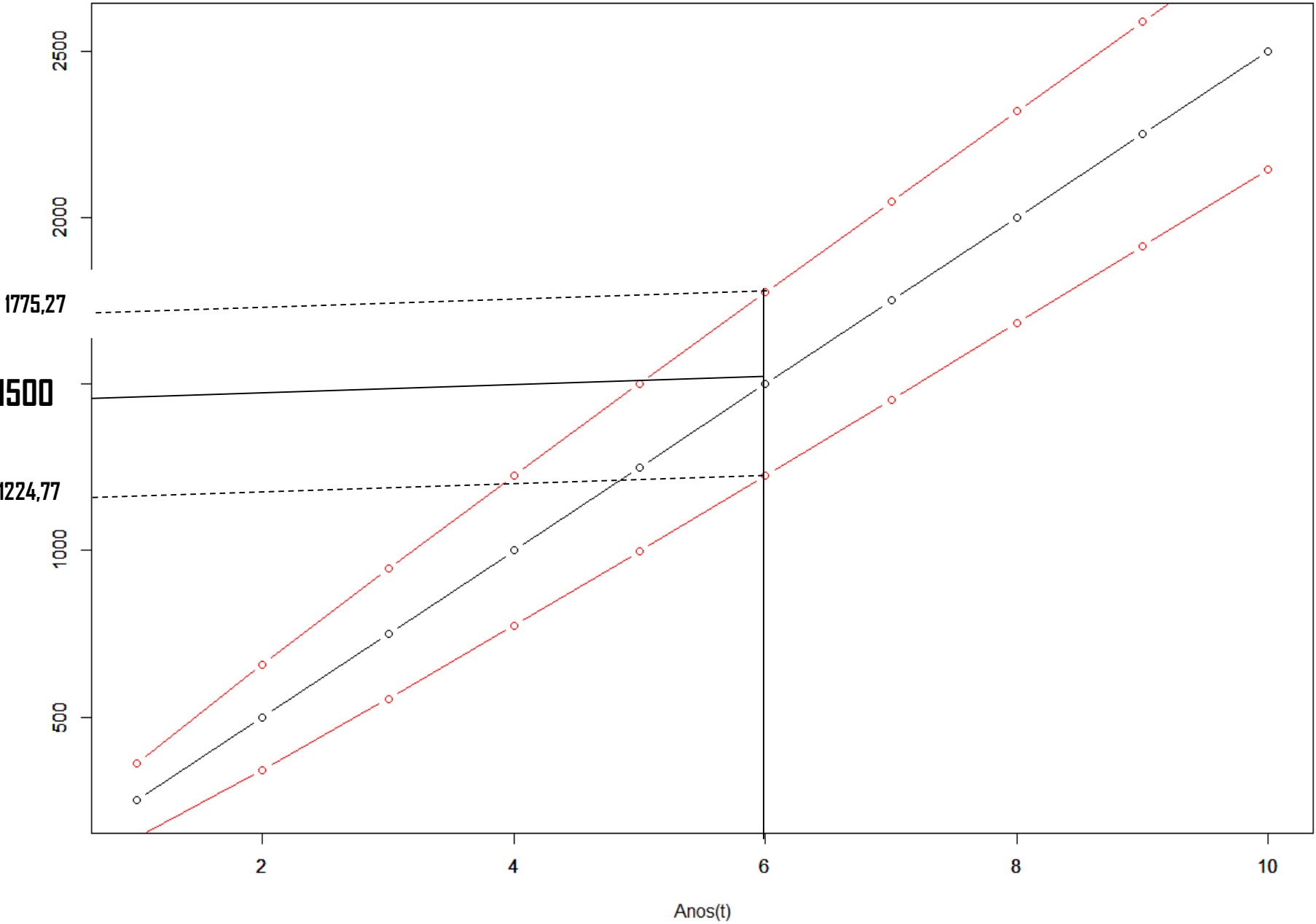
$$E(S_t) = \frac{\alpha}{\beta} (\lambda t) = 5t \left( \frac{100}{2} \right) = 250t$$

$$\text{var}(S_t) = \lambda t \left( \frac{\alpha}{\beta^2} + \frac{\alpha^2}{\beta^2} \right) = 5t(25 + 50^2) = 12625t$$

$$\sigma_{S_t} = 112,361\sqrt{t}$$



$E(S_t)$



# Bibliografia

- FERREIRA, P. P. **Modelos de precificação e ruína para seguros de curto prazo.** Rio de Janeiro: Funenseg, 2002.
- CENTENO, M. L. **Teoria do risco na actividade seguradora.** Oeiras: Celta, 2003.
- PACHECO, R. **Matemática Atuarial de Seguros de Danos.** Editora Atlas, 2014.
- RODRIGUES, J. A. **Gestão de risco atuarial.** São Paulo: Saraiva, 2008.
- PIRES, M.D.; COSTA, L.H.; FERREIRA, L.; MARQUES, R. **Teoria do risco atuarial: Fundamentos e conceitos.** Curitiba: CRV 2020.

