

# Relatório - Iniciação científica

Mateus Scheffer Mendes Maziviero Dolce

7 de novembro de 2025

## 1 Introdução

Buscamos realizar uma simulação simplificada da interação neuronal modelada por um grafo. Os neurônios são representados pelos vértices, e as interações de estímulo e inibição pelas arestas. Cada neurônio possui uma probabilidade de disparo determinada pelo seu potencial de membrana. A simulação ocorre em tempo discreto: um evento de disparo zera o potencial do neurônio disparador e modifica o potencial dos neurônios conectados de acordo com as arestas do grafo.

Neste momento, o objetivo é encontrar uma função que relaciona a probabilidade de disparo com o potencial de membrana. Por razões biológicas, quanto maior o potencial maior a probabilidade, logo queremos uma função estritamente crescente. Por se tratar de probabilidade, a imagem desta função deverá ser limitada  $[0, 1]$ .

Consequentemente, uma sigmoide se apresenta como um notável candidato. Definiremos  $\varphi : \mathbb{R} \rightarrow (0, 1)$  como

$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + e^{-f(x)}}$$

Com o intuito de simplificar a função, limitaremos  $f$  a ser uma função linear  $f(x) = x/a - b$ . Com  $f$  desta maneira,  $a$  influenciará na inclinação da sigmoide e  $b$ , seu deslocamento horizontal.

Para termos  $\varphi(0) = \epsilon$ ,  $b = \ln(\frac{1}{\epsilon} - 1)$ . Já a inclinação dependerá de quanto o potencial de certo neurônio possa variar na passagem do tempo. Sendo  $p_{w^+}$  e  $p_{w^-}$  os pesos esperados positivo e negativo das arestas,  $(p_{w^+} - p_{w^-})(N - 1)$  representa a variação de potencial esperada em certo neurônio se todos os demais dispararem. Então, escolheremos  $a \sim (p_{w^+} - p_{w^-})(N - 1)$ .

## 2 Métodos

### 2.1 Modelo da Rede Neural baseada em Grafos Orientados

#### 2.1.1 Arquitetura do Grafo

- **Vértices:** Usamos  $N$  vértices para representar os neurônios de maneira homogênea.
- **Arestas:** Usamos um grafo orientado aleatório  $G(N, 0.8)$ .
- **Peso das arestas:** Representamos as ações de estímulo e inibição entre os neurônios. Sendo  $w_{i \rightarrow j}$  o peso da aresta que conecta o vértice  $i$  até o  $j$ , neste sentido,

$$w_{i \rightarrow j} = \begin{cases} +1 & \text{com chance } \frac{50\%}{0.8} \\ -1 & \text{com chance } \frac{30\%}{0.8}. \end{cases}$$

#### 2.1.2 Dinâmica do Potencial de Membrana e Disparo

- **Potencial de Membrana ( $V_i$ ):** Representamos por um valor real.
- **Probabilidade de Disparo no tempo  $t$ :** Calculamos a probabilidade segundo uma f.d.p.  $\varphi : \mathbb{R} \rightarrow (0, 1)$ . Sendo  $\epsilon = \varphi(0)$ ,  $p_{w^+}$  e  $p_{w^-}$  os pesos esperados positivo e negativo das arestas, respectivamente e o  $p_e$  o valor que desejamos do  $\varphi(\bar{V})$ . Definimos  $\varphi$  como

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \frac{1}{1 + e^{-(x/a-b)}} \\ b &= \ln(1/\epsilon - 1) \\ a &= \frac{(p_{w^+} - p_{w^-})(N - 1)}{p_e/\epsilon}. \end{aligned}$$

#### 2.1.3 Regras de propagação

1. **Vazamento do potencial:** Sendo  $\rho \in [0, 1]$ , na passagem do tempo  $t$  para  $t + 1$ ,  $V_i \leftarrow \rho \cdot V_i$ .
2. **Modulação do Potencial:** Para cada neurônio vizinho  $j$  de um neurônio disparado  $i$ ,  $V_j \leftarrow V_j + w_{i \rightarrow j}$ .
3. **Restauração do Potencial:** Caso um neurônio  $i$  tenha disparado,  $V_i \leftarrow 0$ .

## 2.2 Implementação Computacional

### 2.2.1 Ambiente de desenvolvimento e linguagem

- **Linguagem de programação:** C++17.
- **Compiladores:** MinGw, GCC.
- **Sistema Operacional:** Windows 11, Linux(Ubuntu).

### 2.2.2 Estrutura de Dados para o Grafo

- **Representação do Grafo:** Armazenamos os pesos por meio de listas de adjacência *viz*, com um *array* da estrutura *vector*. Cada elemento na lista do vértice  $j$  guarda o *pair*  $(i, w_{i \rightarrow j})$ .
- **Geração de N.A.:** Usamos a biblioteca padrão `<random>` e o algoritmo `mt19937` para fazer a `uniform_real_distribution<double> dist(0.0, 1.0);`.

### 2.2.3 Parâmetros da Simulação e Condições Iniciais

- **Parâmetros:**

- $N$ : Número de neurônios.  $N$  testados: 70, 100, 300 e 800.
- $n$ : Duração da simulação.  $n$  testados: 10, 100, 1000 e 5000.
- $\rho$ :  $\rho = 0.95$ .
- $p_{\max}$ :  $p_{w^+} = 0.5$ .
- $p_{\min}$ :  $p_{w^-} = 0.3$ .
- $p_0$ :  $\epsilon = 0.05$ .
- $p_e$ :  $p_e = 0.3$ .

- **Condições Iniciais:**

- $V[N]$ : Potenciais iniciais ( $V_i$ ). Escolhemos  $V_i = \varphi^{-1}(p_e)$ .

## 2.3 Análise de Dados e Métricas

- **Métricas de Atividade Neural:** Quantidade de disparos no tempo  $t$ .

- **Métrica do Potencial de Membrana:**

- $\bar{V}$  no tempo  $t$ .
- $(V_i)_{i \leq N}$  no tempo  $n + 1$ .
- $V_i$  máximo e mínimo em toda simulação

### 3 Resultados

Os resultados a seguir foram obtidos a partir do algoritmo `mt19937`, com  $seed = 1$  para gerar o Grafo e  $seed = 0$  para determinar os disparos.

#### 3.1 70 neurônios

##### 3.1.1 10 interações

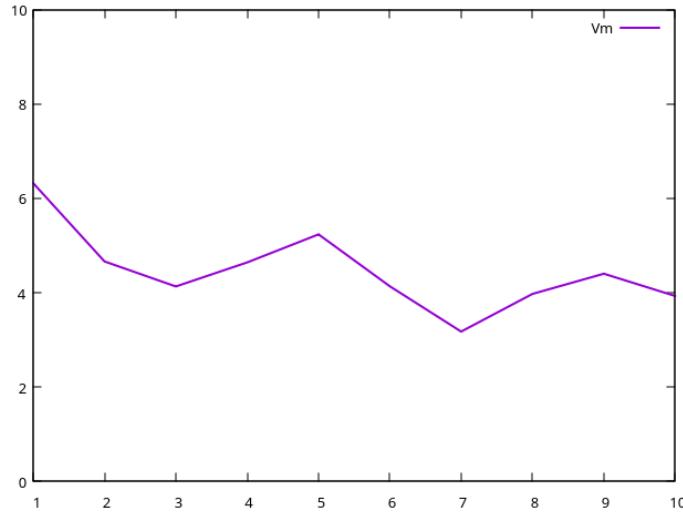


Figura 1:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 70$  e  $n = 10$ .

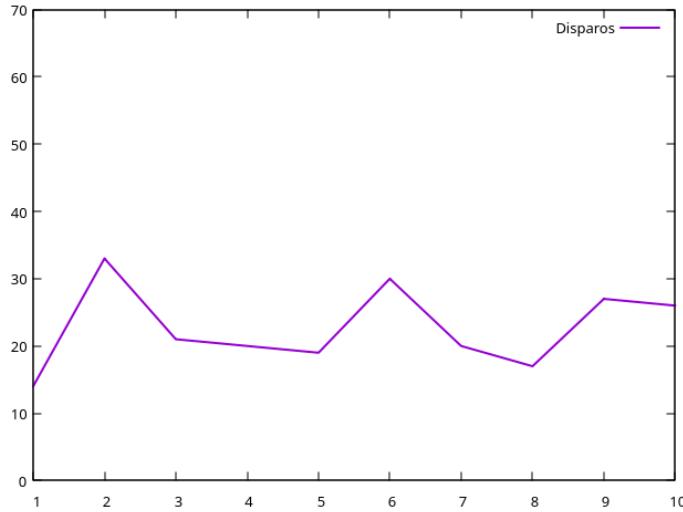


Figura 2: Disparos por  $t$ ,  $N = 70$  e  $n = 10$ .

#### Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 0 0 -3.7526 0.043125 -4.8699 0 16 0.1 12.858 8 0 3.6375 9.6 5 0.2 0 0 10 0 9 0 -2 0 14 0 8.95 7 11 13.75 4 7.1875 0 7 0 -3 1 0 3 12 0 0 8.655 -0.85 0 14.95 10.65 0 0 -3 0 6 5 0 0 2.0474 0 0 0 5 15.6 5 0 3.983 8 0 20.35 0 11 8 5
- $V$  minimo durante a simulação: -11.417
- $V$  máximo durante a simulação: 26.3

### 3.1.2 100 interações

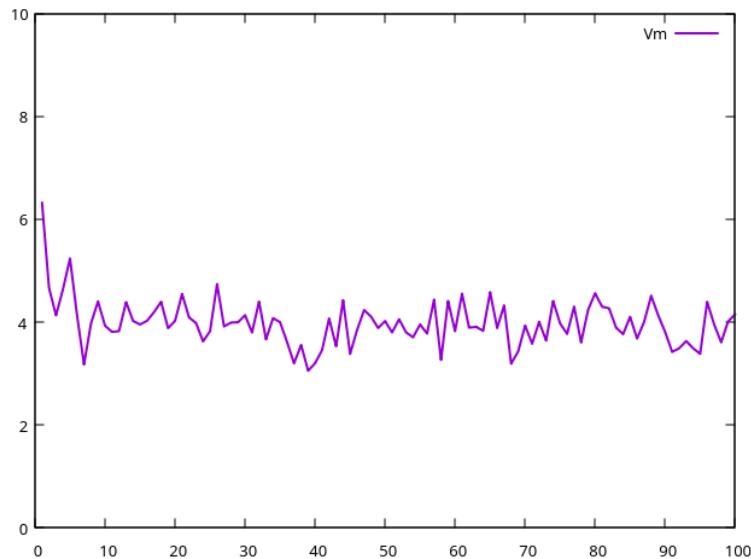


Figura 3:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 70$  e  $n = 100$ .

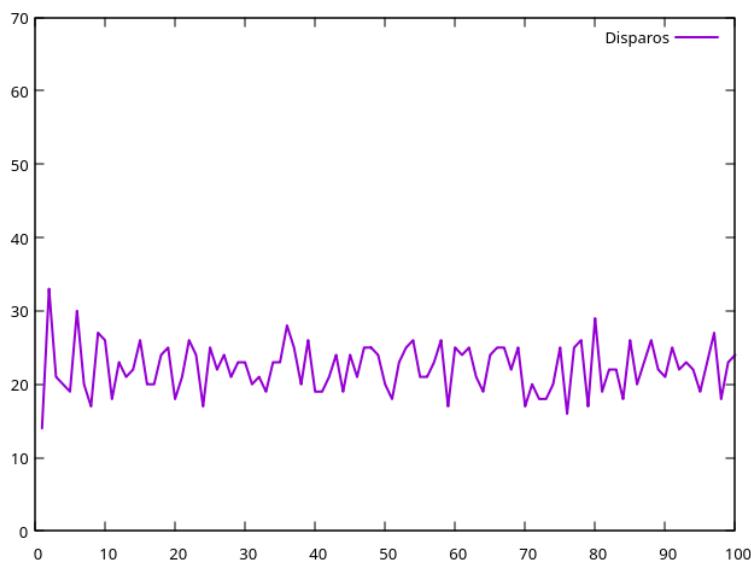


Figura 4: Disparos por  $t$ ,  $N = 70$  e  $n = 100$ .

### Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 5.95 0 1.6374 -4.4227 5.145 0 0 0 0 13.7 3 0 13.8 6.85 0 11 0 6 0.5575 15.51 0 0 9.75 17.65 0 4.1 8.5223 0 4 10.833 0 3 13.75 0 0 -6.4344 7 12.75 8 9.4125 0 -0.49 9 0 4 4 5 2 2 4 4.5269 8 3 0.29012 0 7 5 0 0 0 8.85 3.6951 8.6196 12 12 8 0 0 0 -1
- $V$  minimo durante a simulação: -15.194
- $V$  máximo durante a simulação: 26.3

### 3.1.3 1000 interações

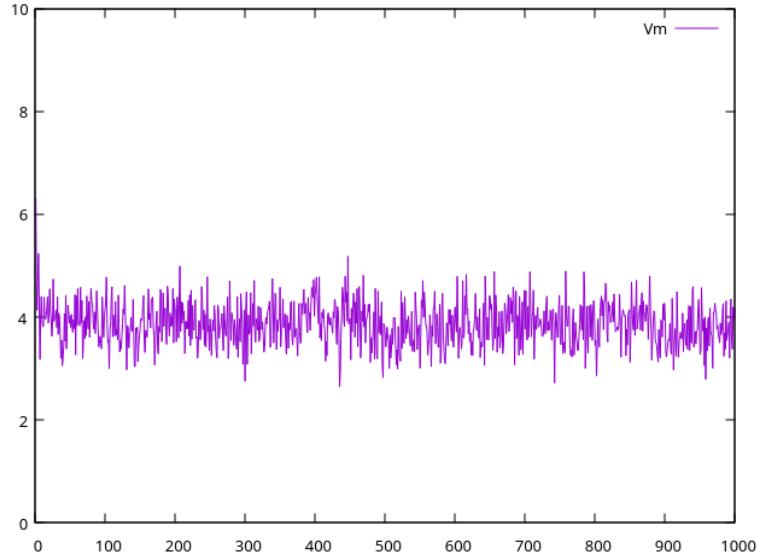


Figura 5:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 70$  e  $n = 1000$ .

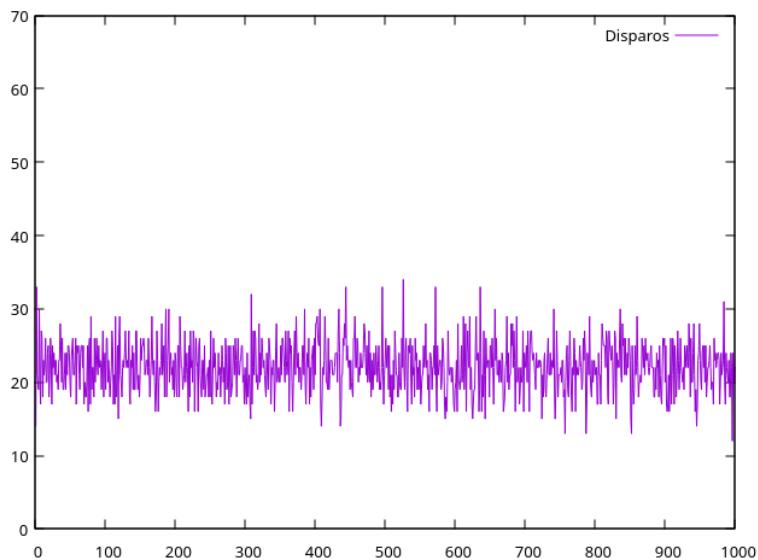


Figura 6: Disparos por  $t$ ,  $N = 70$  e  $n = 1000$ .

### Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 5 0 -0.77278 -7.7651 -9.2867 4 0 2.6383 0 0 0 1.2412 0 5 6.3673 13.75 8 0 -0.65191 0 9.75 7.0583 8.75 0 8 4 5.8 17.7 6 3 6 0 3 0 8 1 6 8 16.7 2 0 0 10.7 -1 8 0 0 0 -2 10.6 0 0 5.95 5.4015 0 12.6 7.85 11 8 0 7.465 0 4.05 0 14.75 15 4.9575 4.7 5.7 9.3125
- $V$  minimo durante a simulação: -21.654
- $V$  máximo durante a simulação: 30.962

### 3.1.4 5000 interações

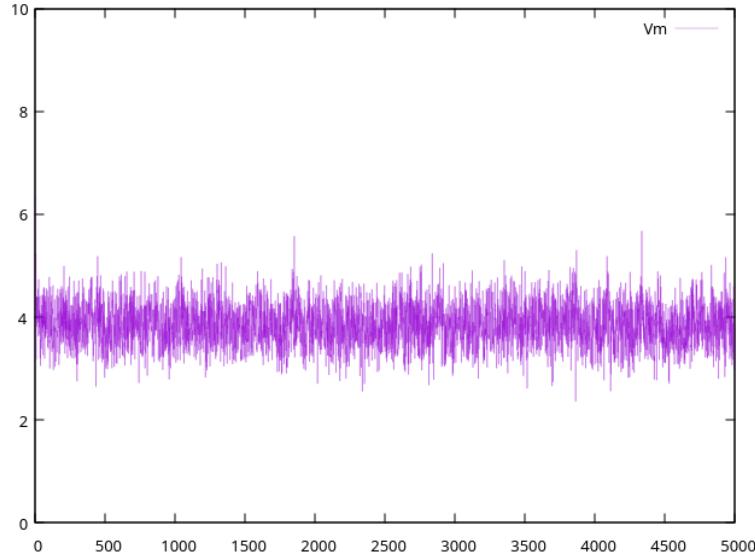


Figura 7:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 70$  e  $n = 5000$ .

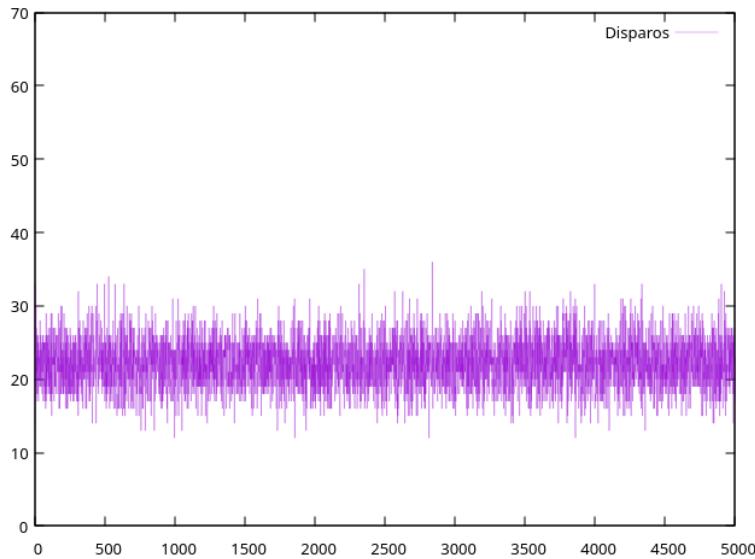


Figura 8: Disparos por  $t$ ,  $N = 70$  e  $n = 5000$ .

### Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 4.8 4 -4.7353 -11.479 -11.878 0 11 0 2.14 0 5.75 -7 8 5 0 0 0 11.462 -1.95 6.75 19.117 1.9559 5 5 0 6.95 2.045 0 4 9.85 5 0 4 15.7 0 -3.8683 10.65 12.94 8 6 8 1.9 4.05 11.75 6 0 6 0 3 3 0 4 3 5.855 1.34 14.5 0 9.65 12.6 10.7 0 1 3.1 0 7.9 6 3.3625 1 6 0
- $V$  minimo durante a simulação: -27.519
- $V$  máximo durante a simulação: 35.2

## 3.2 100 neurônios

### 3.2.1 10 interações

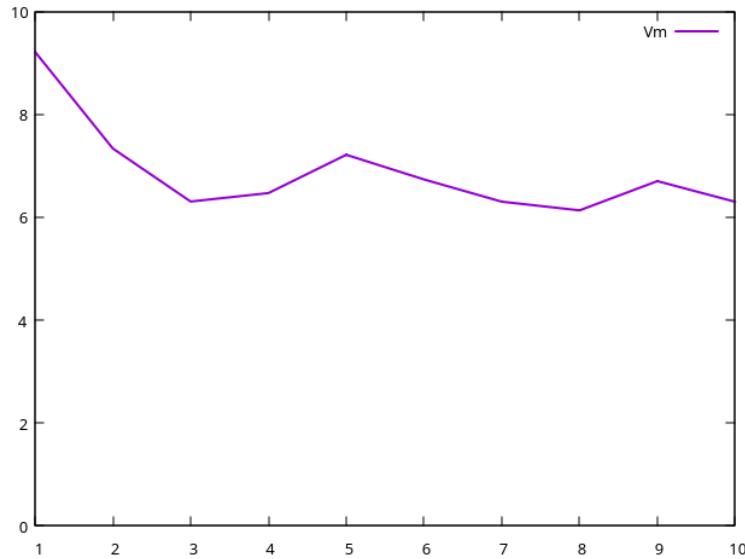


Figura 9:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 100$  e  $n = 10$ .

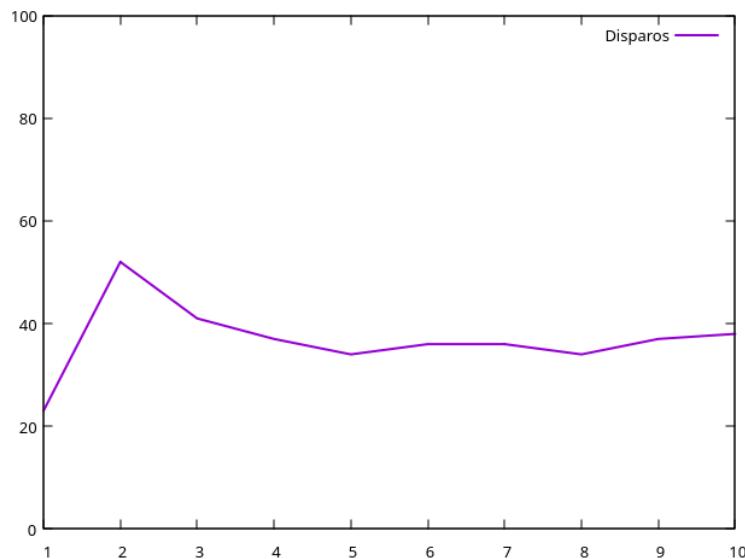


Figura 10: Disparos por  $t$ ,  $N = 100$  e  $n = 10$ .

### Potenciais Finais:

- $V$ 's final: -2.6012 -17.246 0 0 7.05 0 11 15.752 0 0 13 13 8 0 10 0 13 7.6625 23.5 0 7.75 8 0 19.334 6 0 3 9 8.05 0 0 7 9.8 3 9 6 21.559 0 11 12 0 0 0 21.4 0 8.5225 11 0 17 0 23.45 12.502 0 2 0 0 8 5 0 1 0 0 10.8 0 22.255 10 0 0 13 0 4 27.172 8 0 3 7 7 0 5 0 0 5.2 4 0 16.605 0 18.6 10.7 14.951 0 8 11 12.65 3 11.95 0 0 12 15.55
- $V$  minimo durante a simulação: -17.246
- $V$  máximo durante a simulação: 31.096

### 3.2.2 100 interações

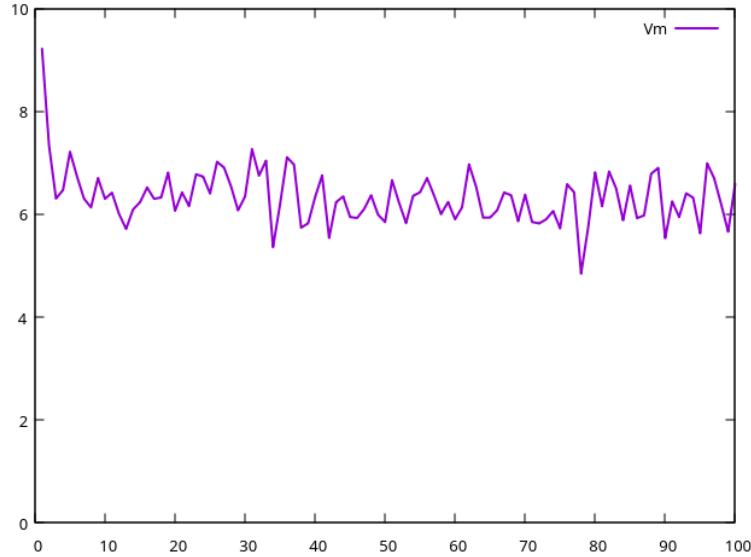


Figura 11:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 100$  e  $n = 100$ .

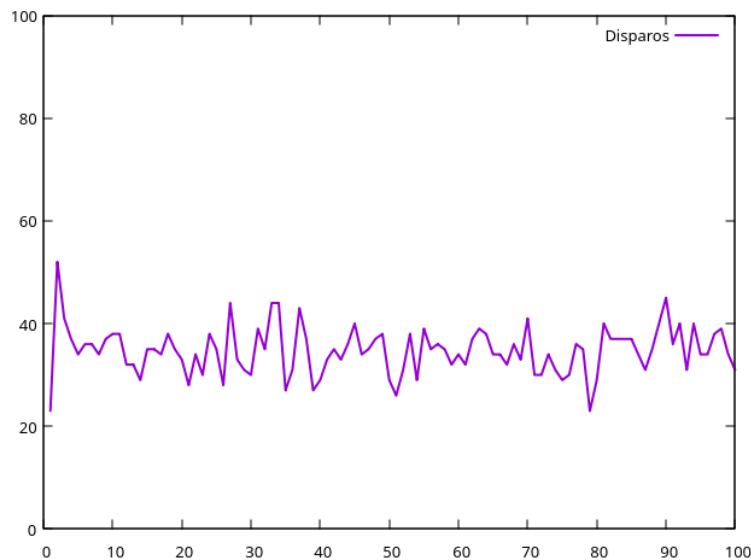


Figura 12: Disparos por  $t$ ,  $N = 100$  e  $n = 100$ .

### Potenciais Finais:

- $V$ 's final: -11.778 -21.382 12 18.45 4.1772 6 21.834 0 1 15 25.45 14.75 6 0 0 0 9 13.649 12 19.767 4 0 14 4 6 7 5.6 0 9 0 12.6 0 0 12.9 5.56 4.8 9.7475 0 0 0 11.1 4 3.65 3 14 11.95 0 6 15.75 7.5075 18.45 0 0 0 10.85 0 0 5 13.55 0 0 9 15.6 0 0 19.5 7.75 0 0 10.992 18.967 18.8 9 0 0 0 9 0 11.9 28.87 5 -1 10 0 -5 0 7 2.9 0 12 18.5 20.505 10 13.8 -4 9 0 17 17.7
- $V$  minimo durante a simulação: -35.326
- $V$  máximo durante a simulação: 35.2

### 3.2.3 1000 interações

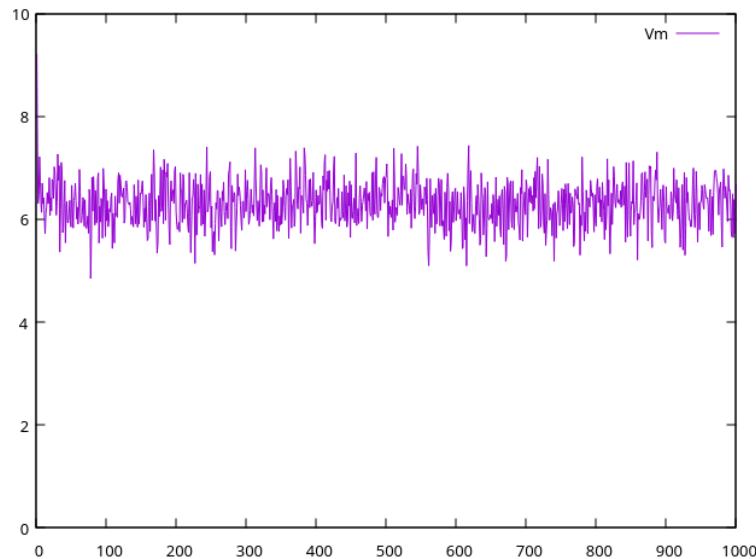


Figura 13:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 100$  e  $n = 1000$ .

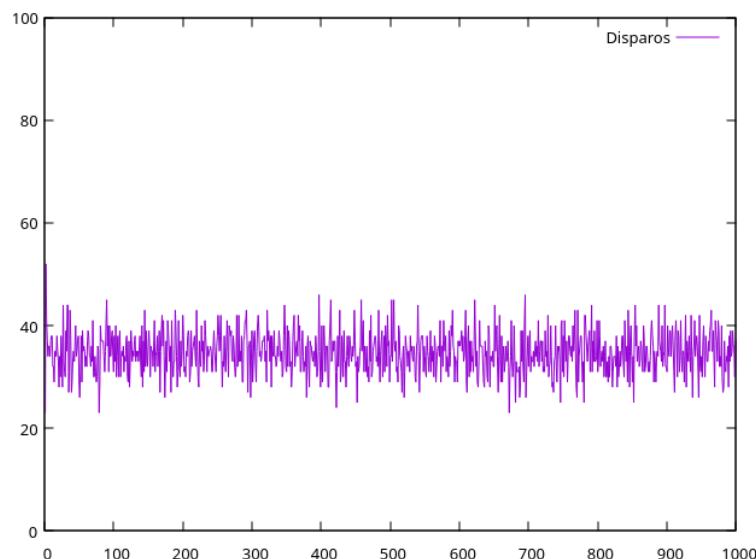


Figura 14: Disparos por  $t$ ,  $N = 100$  e  $n = 1000$ .

#### Potenciais Finais:

- $V$ 's final: -5.5162 -9.8398 5 0 -2.6273 4 5.9 11.6 9.045 12 0 0 0 0 25.015 14 21.55 9 10 0 10.55 9 0 0 16 0 6 13.8 0 0 16.312 11 0 0 0 0 8.9 0 17.5 15.602 6 14.75 0 0 2.7 0 18.902 0 4.555 10.45 13.75 16 5 0 0 17 12.8 11.9 12.05 0 10.7 7 0 0 0 17.373 14 9 7 0 0 0 0 12 10 0 4 9.6174 8 0 1.1 12 27.65 9 27.773 0 6 0 18.5 5 22.4 9 12.75 0 0 20.343 0 0
- $V$  minimo durante a simulação: -39.99
- $V$  máximo durante a simulação: 39.71

### 3.2.4 5000 interações

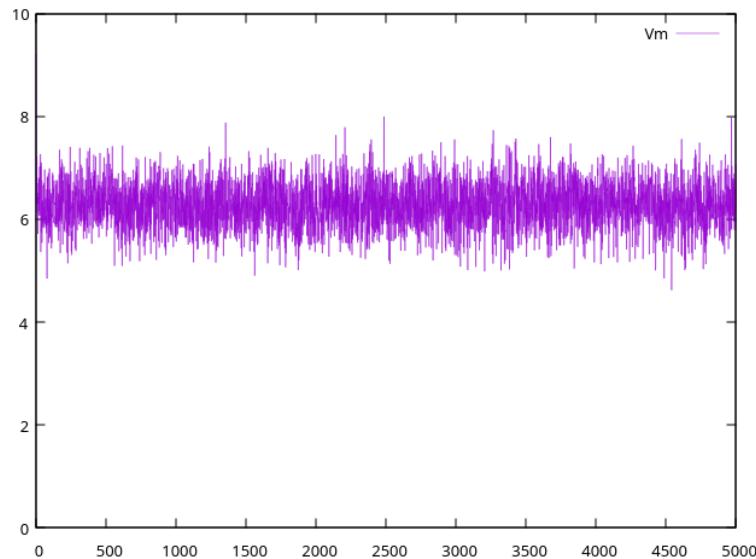


Figura 15:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 100$  e  $n = 5000$ .

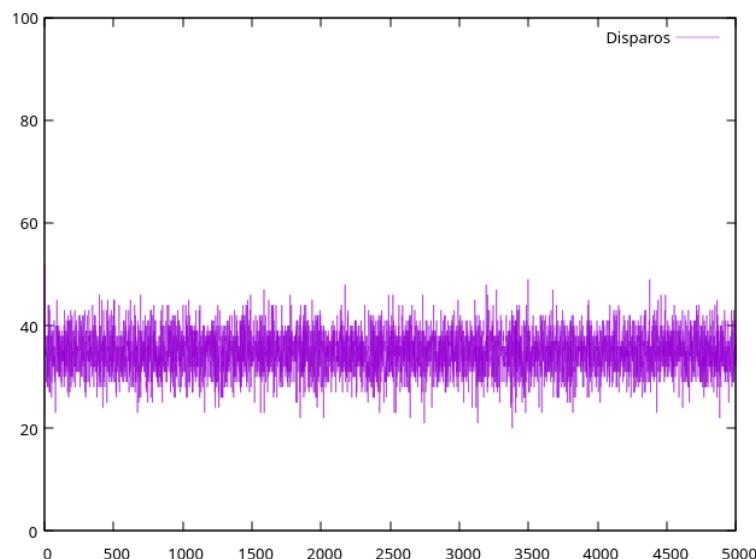


Figura 16: Disparos por  $t$ ,  $N = 100$  e  $n = 5000$ .

### Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 9 -14.989 -20.358 0 34.2 11.847 23.25 12 11.85 0 13 9 10.32 10 13 0 0 10 4 0 21.65 0 0 17.6 -1 0 0 7 0 8.05 21.6 0 6 0 0 0 13.707 4.8 4 0 0 0 16.7 0 0 0 7.5625 19.75 14.55 10 11.85 12 12 10 0 9 0 0 12.75 4 7 4 0 8 4 15.55 7 0 0 0 0 0 0 3 0 7 11 0 9.95 6.9904 0 18.55 6.7 23.5 3 6.15 0 0 10.7 1 0 0 9.65 20.75 7 16 0 0 12 21.4
- $V$  minimo durante a simulação: -43.94
- $V$  máximo durante a simulação: 43.185

### 3.3 300 neurônios

#### 3.3.1 10 interações

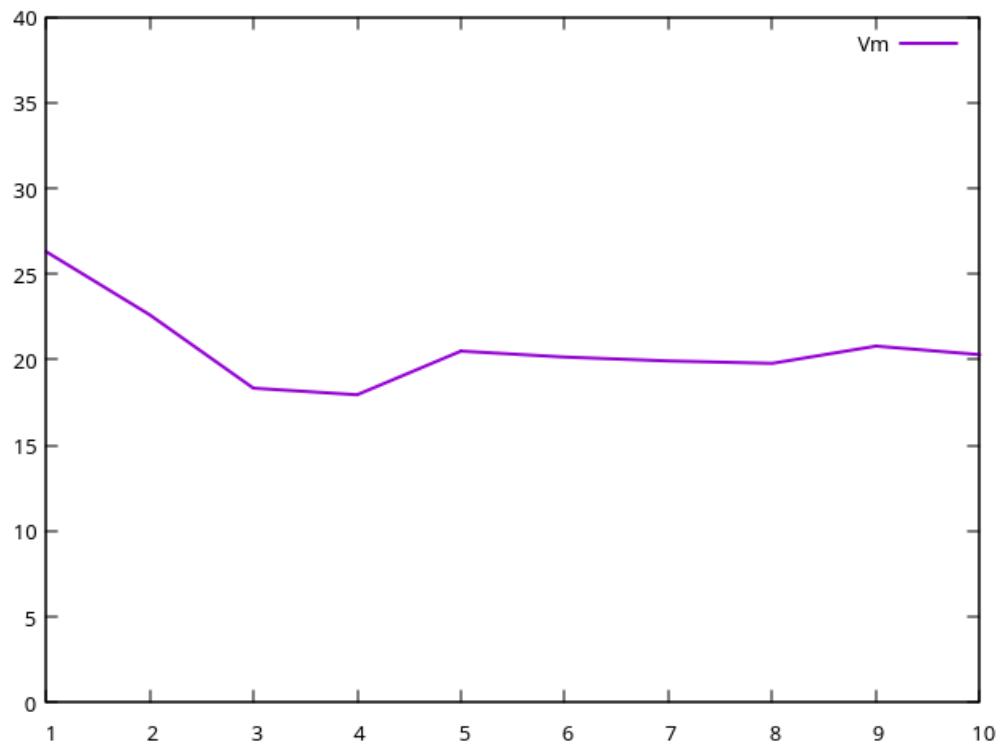


Figura 17:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 300$  e  $n = 10$ .

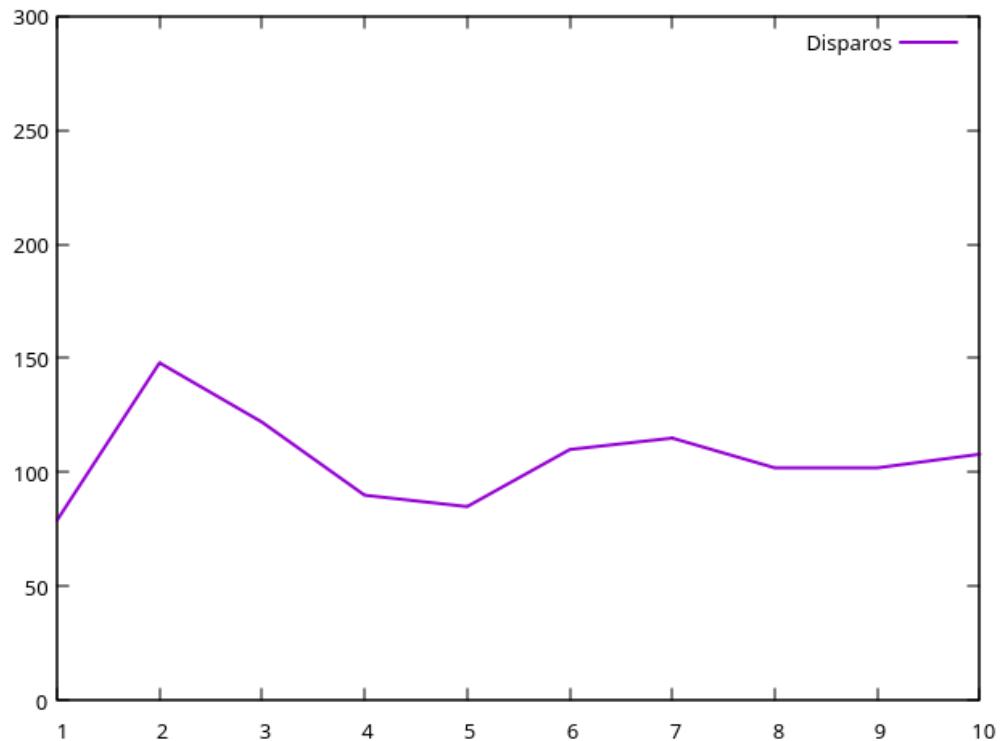


Figura 18: Disparos por  $t$ ,  $N = 300$  e  $n = 10$ .

## Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 27.518 28 27.05 0 38.6 33 28 56.653 15 56.145 29 44.75 -4 11 0 17 25 40.25 39.05 19 27 39.15 0 0 60.865 30 0 0 0 24.75 38 0 0 35 0 0 67.041 0 51.8 34 0 0 0 0 24.55 0 11 12.4 50.95 0 46 30.087 21 51.216 57.17 0 0 26 15 0 0 18 0 29 33.285 22 33 27.5 0 0.6 0 0 0 44 16 22 0 24 29.4 58.095 0 0 36.4 30.95 0 40.219 0 0 0 0 0 29.65 31.45 0 27 12 0 23 0 43.8 0 25 51.435 35.8 59.252 0 26.05 25 39.05 23 35.1 23 42 0 41.65 40.4 0 50.6 73.495 57.6 46.9 0 17 15 45.4 0 0 20 61.528 0 65.525 42.35 0 0 0 0 0 25 46.1 52.55 7 0 30 54.75 41.43 0 0 28.4 44.55 47.8 14 0 0 2 0 27.45 43.745 0 19 0 0 18 11 40.25 0 26.65 11 6 0 27 22.4 0 46.572 31.3 0 32 17 15 9 27.1 0 0 21 60 0 0 0 24 34 24 30.45 16 31.95 33.83 0 18 0 16 38.35 51.2 0 41.9 0 21 25.1 53.131 0 2 23 0 23.9 41.9 26 0 0 0 38 0 18 0 0 19 0 5 0 23 23 44.811 4 0 0 50.95 23.5 56.438 17 9 67.857 26.2 48.8 0 18 25 47.65 57.849 15 26 40.25 0 31.55 69.615 37.85 82.927 18 0 44.1 25 18 0 0 31 15 47.453 0 0 0 0 44.8 0 57.4 0 23 38 0 52.183 0 12.75 27 0 0 44.65 0 0 19 34 21 28 23 23 0 0 68.192 0 4 0 15 24 13 34
- $V$  minimo durante a simulação: -12
- $V$  máximo durante a simulação: 87.064

### 3.3.2 100 interações

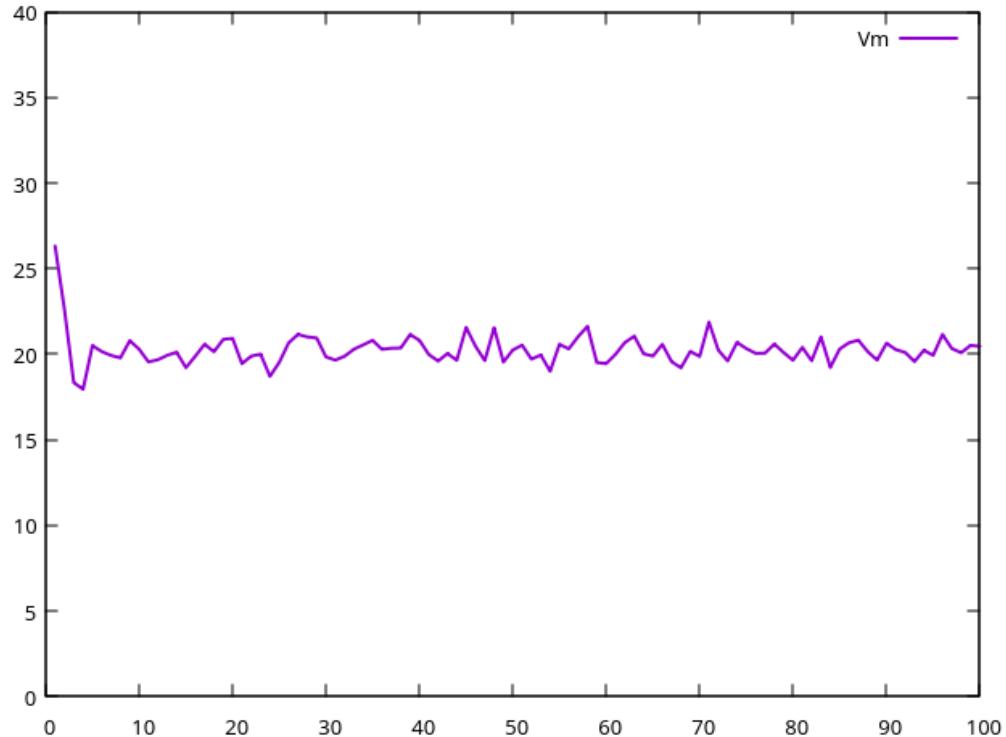


Figura 19:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 300$  e  $n = 100$ .

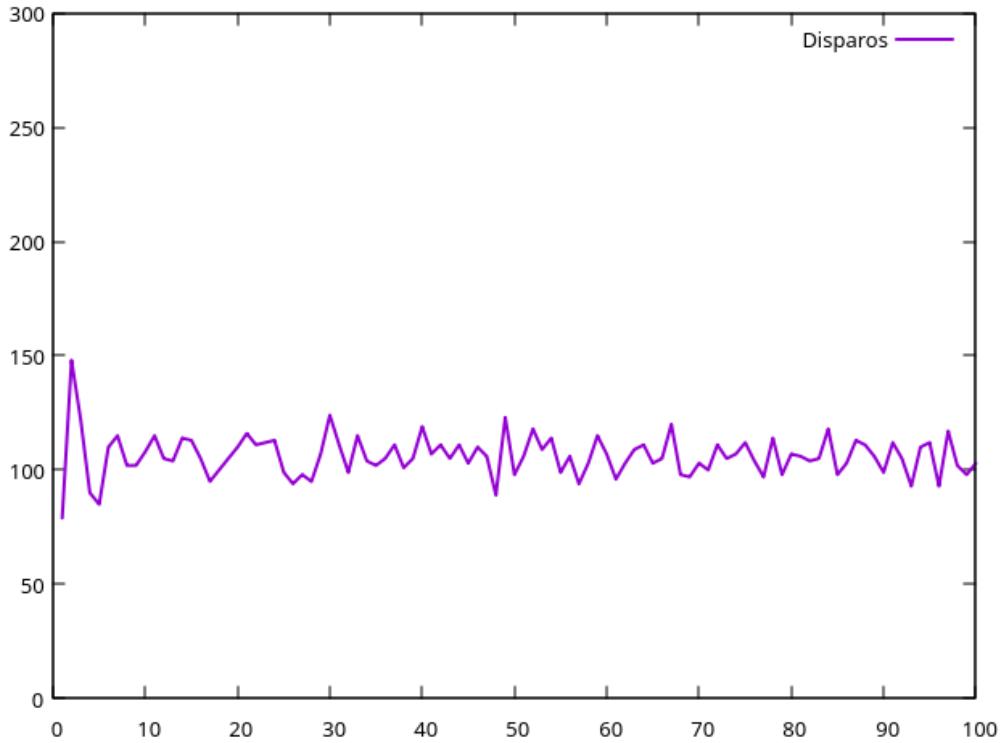


Figura 20: Disparos por  $t$ ,  $N = 300$  e  $n = 100$ .

#### Potenciais Finais:

- $V$ 's final: -1 35 0 33 59.689 34 23 58.942 19 0 61.05 38.2 35.8 29 45.75 28.95 26 26 56.555  
36.2 28 31.5 0 18.6 29 20 10 42.15 0 0 10 41.1 24 55.4 20 58.65 0 44.2 0 47.15 42.883 20.55  
0 46.44 31.1 13 35 49.442 0 0 27 15 46.7 33.832 39.05 0 30.9 17 22 20 0 0 26 35.472 0  
0 11 13 23.899 20 22 13 46.053 0 29.15 31.45 0 0 0 0 0 25 55.05 33 45.35 0 0 0 26 0 0  
53.8 25.8 74.55 1 31.1 35 36.442 15 10 0 70.514 59.062 0 0 0 0 21 22 0 0 24 54.015 34.497  
33.55 28.95 6 46.35 0 0 27 0 11 22.3 12 0 0 18 16 11 0 0 0 0 3 45.9 0 45.65 60.5 0 0 30  
28 26.45 23.85 54.8 42.46 27 32 0 29 45.05 0 19 8 0 56.5 10 56.053 12 46.045 37.422 0 33  
21.65 0 43.95 9 64.987 20.1 0 0 59.928 56.5 30.06 0 50.08 14 22 0 0 31.5 24 42.497 0 45  
44.95 45.7 14 62.69 0 0 0 26 0 0 32.9 26 38.55 37.95 5 38.45 0 21.65 65.182 0 0 45.95 0  
21 10 0 25.35 0 0 0 12 33 28.15 18 0 7 68.305 43.25 26 0 29.55 0 0 0 0 0 39.05 41.6  
41.35 0 14 43.3 0 23 24.65 38.1 24.9 21 27.4 51.95 0 36.25 18 16 27 0 22 0 0 14 27 17 0 0  
35 0 0 0 14.36 0 20 30.7 13 0 36 34.75 12 0 36.417 0 29 8 12 36.35 0 0 31 68.75 20 0 31 0  
0 16 29.245 34.5 0 19.25 0
- $V$  minimo durante a simulação: -12
- $V$  máximo durante a simulação: 99.075

### 3.3.3 1000 interações

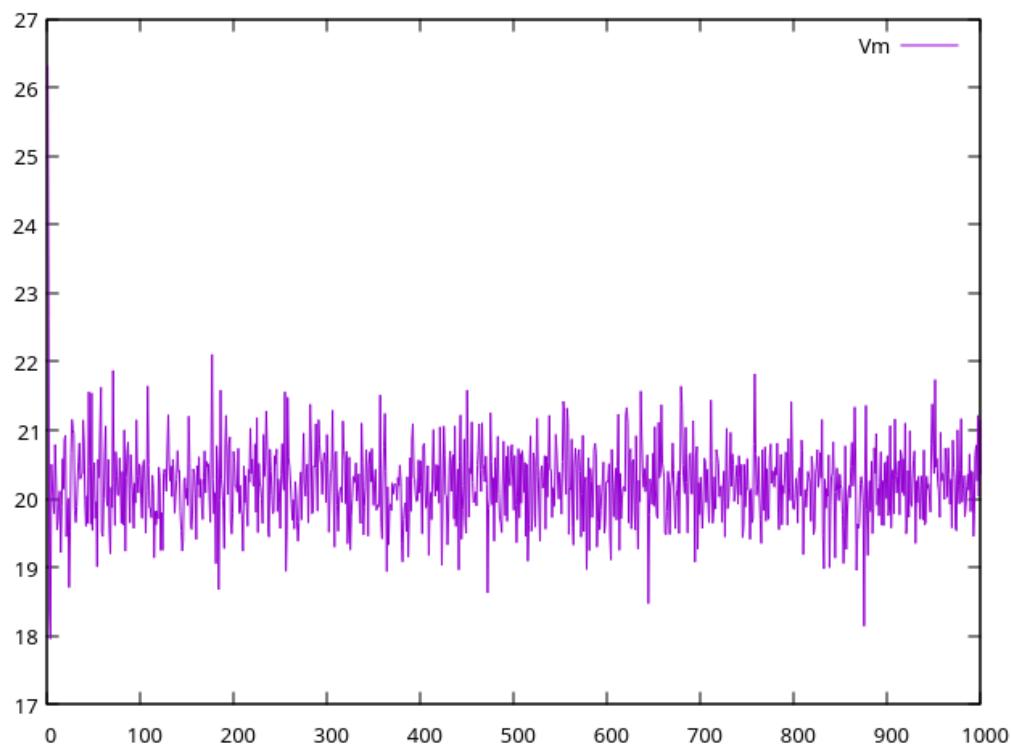


Figura 21:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 300$  e  $n = 1000$ .

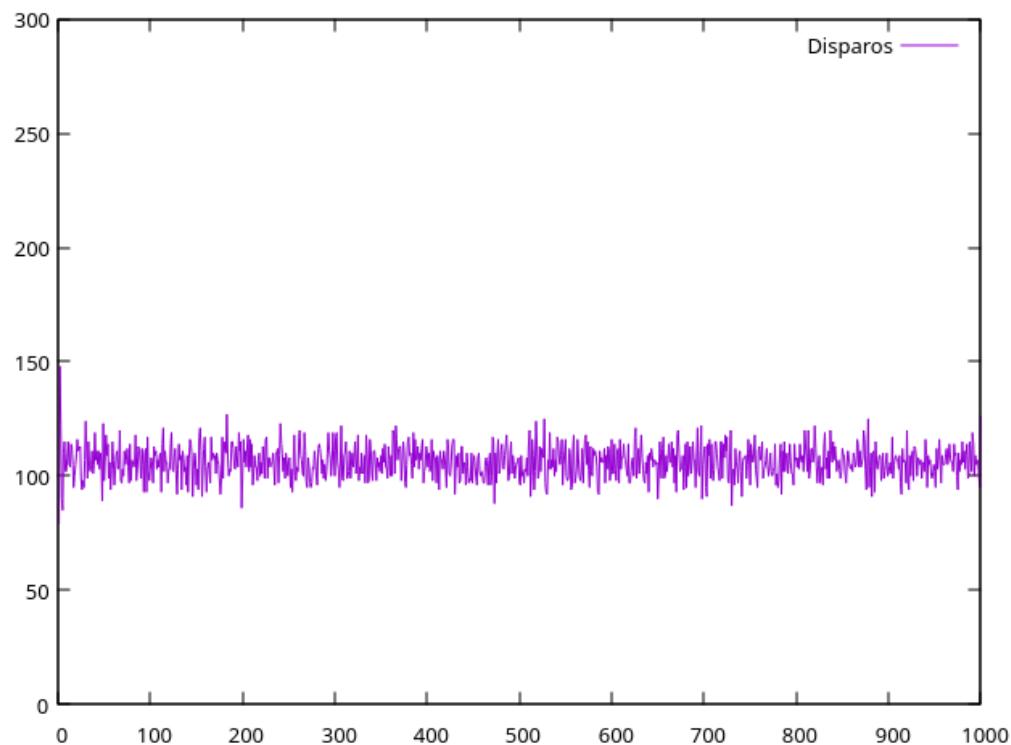


Figura 22: Disparos por  $t$ ,  $N = 300$  e  $n = 1000$ .

### Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 21 0 35 20 0 23 27 0 0 0 0 52.47 36.68 0 53.3 0 0 53.25 23 43.9 0 0 27 39 41.4 38.85 0 0 28 11 0 48.5 0 68.35 0 52.75 51.038 0 0 59.4 0 17 28 0 17 25.95 0 0 0 74.686 37 32.587 38.5 16 0 0 0 44.513 0 47.05 20 20 0 0 0 41.9 0 18 0 0 44.1 0 0 53.5 27 0 0 44 47.05 35.2 38.95 77.222 19.5 0 22 0 0 36 0 28 17 6 0 0 42 0 0 34 42.468 11 47.7 29.3 0 0 0 50.41 19 49.835 27 68.748 0 0 43 0 0 43.9 24 41.65 20 0 32 0 59.05 23 25.35 0 37.035 57.15 54.597 50.85 55.845 43.05 0 0 32 21 40.2 0 0 38.95 32 5 0 63.85 34 0 0 69.4 0 26 45.3 37.79 54.95 0 25 55.39 0 0 0 0 0 33 59.335 6 36.95 56.5 0 25 17 19.25 0 34.978 67.95 0 24 0 32 0 0 0 0 27 0 0 0 28 0 38 35 31 0 0 59.203 0 30.6 47.1 0 36 54.95 0 0 36.95 0 26 0 15 41.515 16 31 0 0 28.4 30.85 44.85 0 38.85 23 0 36 20 69.205 27.45 44.25 17 58.5 31 0 20 16 0 0 26 39 0 0 0 47.35 13 26 0 32.3 28 26 35 0 22 28 19 41.6 30 0 35.25 66.715 0 56.65 11 0 0 43.35 52.35 0 40.742 43.792 24 0 17 19 0 7 25 37.9 0 0 0 0 0 21.65 18 44.81 0 0 11 0 48.3 0 0 36 25 0 0 31 27 0 0 34.962 0 0 8 0
- $V$  minimo durante a simulação: -15
- $V$  máximo durante a simulação: 116.03

#### 3.3.4 5000 interações

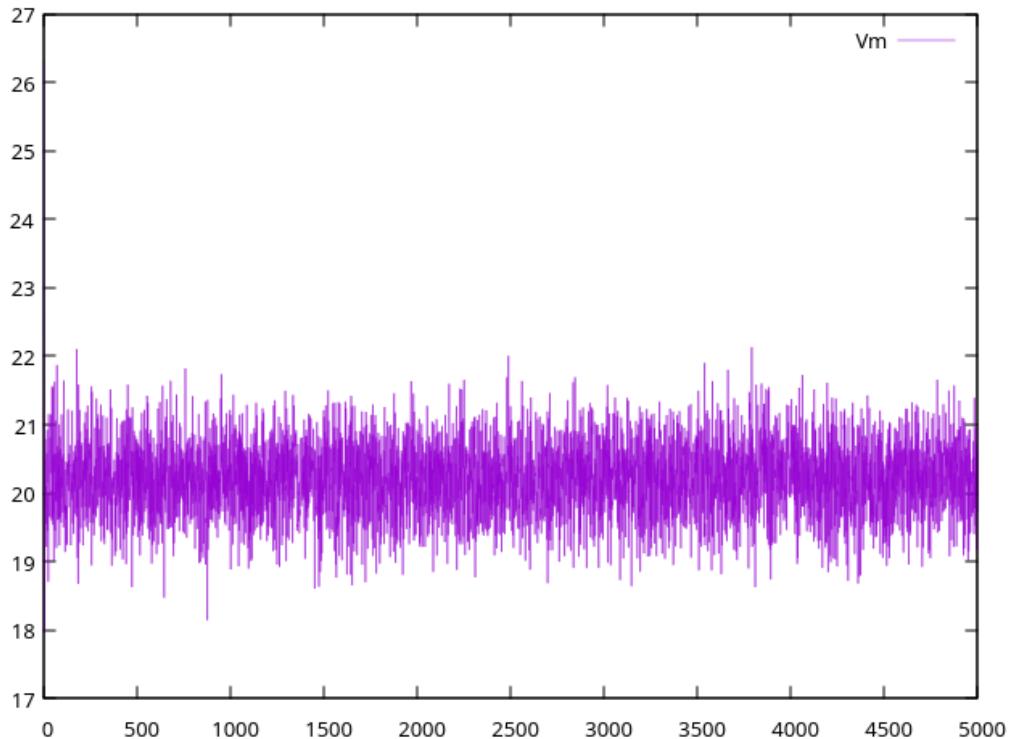


Figura 23:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 300$  e  $n = 5000$ .

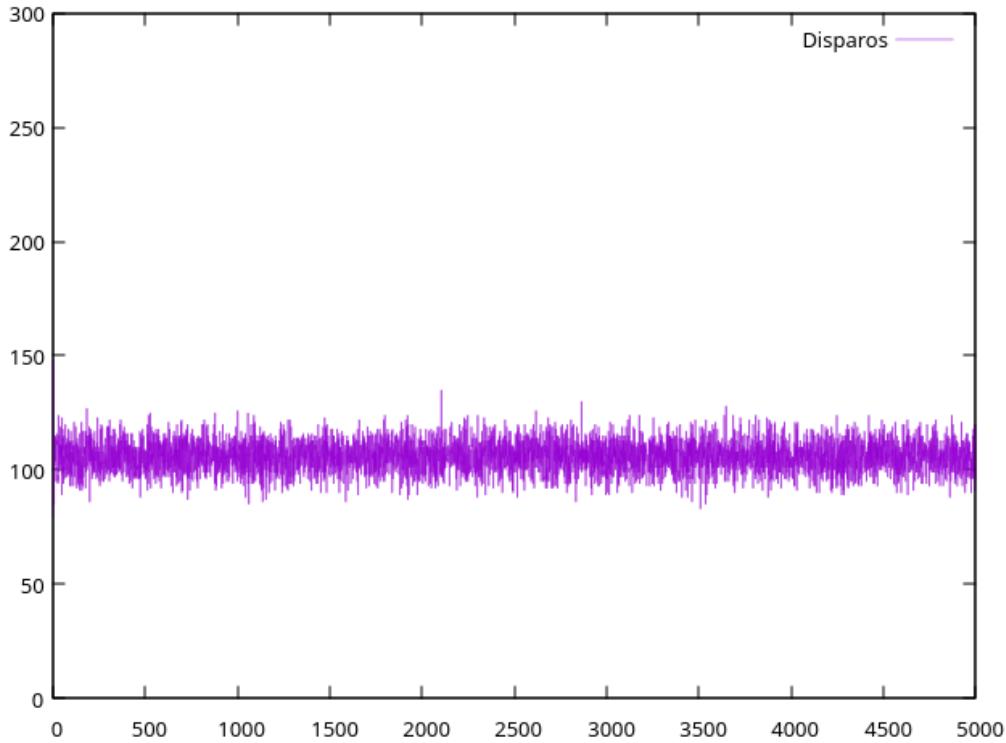


Figura 24: Disparos por  $t$ ,  $N = 300$  e  $n = 5000$ .

#### Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 0 46.35 16 0 0 0 0 0 30 27 0 22 14.45 0 39.55 25 37.2 42.85 47.4 23 0 0 0 45.85 41.8 23 13 35.25 0 19 19 43.15 0 0 33.05 29 44 75.9 26 26 13 9 71.578 50.9 21 19.4 43 39.35 17 18.65 24 32.526 23 25.25 18.45 0 48.95 31.45 8 33.8 0 17 24 52.55 14 0 28 42.155 0 0 12 0 33.3 56.782 0 26.9 0 0 0 17 36.1 31.15 39.8 0 39 46.9 20 34.1 0 0 21.8 33.65 62.112 18 0 51.55 26.35 0 29.765 0 51.772 35.815 0 36.35 28.15 0 13 0 52.79 26 47.755 58.575 42.15 44.95 42.507 0 34 48.35 24 0 34 21 50.95 13 25.5 0 26.657 47.8 6 45.8 0 23 0 0 47.5 51.092 19 10 35.3 30.85 0 15 0 21 54 21 15 26 0 30.4 33 15 0 0 60.041 0 37.6 17 30 0 16 5 27 0 30.95 23 0 0 11 25 25 0 0 19 25 35.05 0 32 0 10 2 23 0 14 17 0 0 16 45.85 0 0 0 37.8 0 0 18 15 0 3 51.3 0 45.95 38.55 0 35 0 45.898 0 19 36.25 33.95 13 39.25 0 0 0 33.15 55.59 0 30 40.9 25 37.5 0 0 0 29.85 0 50.3 34.787 13 0 59.7 15 34.4 40.2 51.572 0 28.45 8 29 12 32 15 56.05 21 0 0 29 0 18 13 22.4 0 13 56.3 0 24 58.265 49.95 0 52 14 0 0 59.75 23.3 8 0 22 0 41 56.166 57.41 24.85 29.15 20 0 0 0 9 23 6 0 47.05 29 0 52.75 0 46.9 0 34 0 30 12.6 0 40.7 0 0 25
- $V$  minimo durante a simulação: -21
- $V$  máximo durante a simulação: 116.87

### 3.4 800 neurônios

#### 3.4.1 10 interações

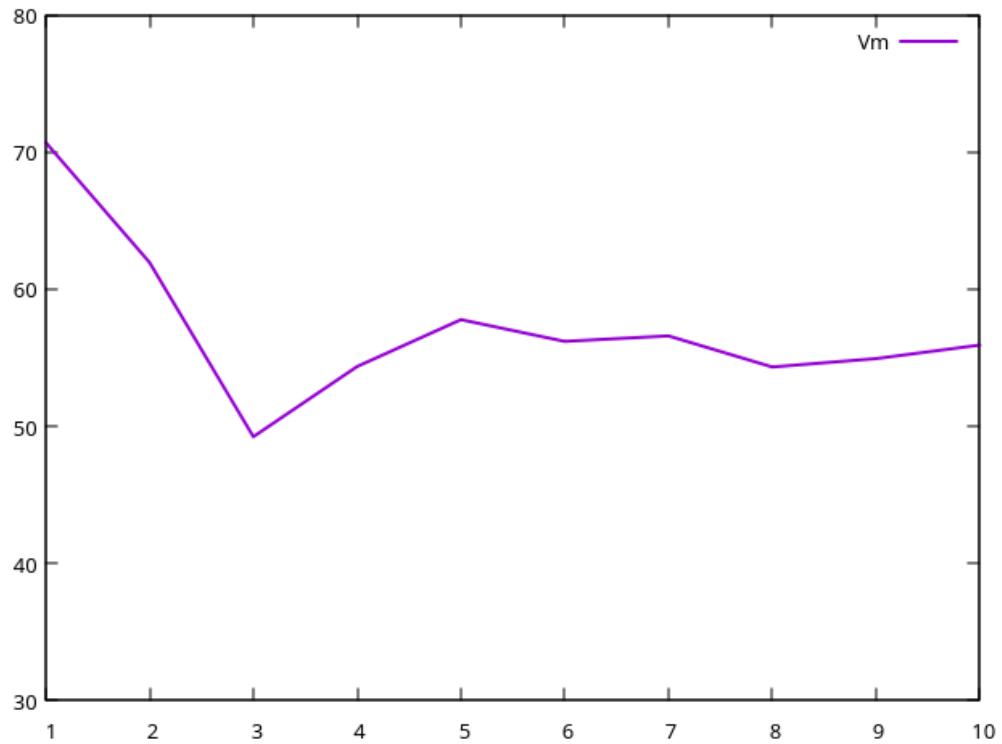


Figura 25:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 800$  e  $n = 10$ .

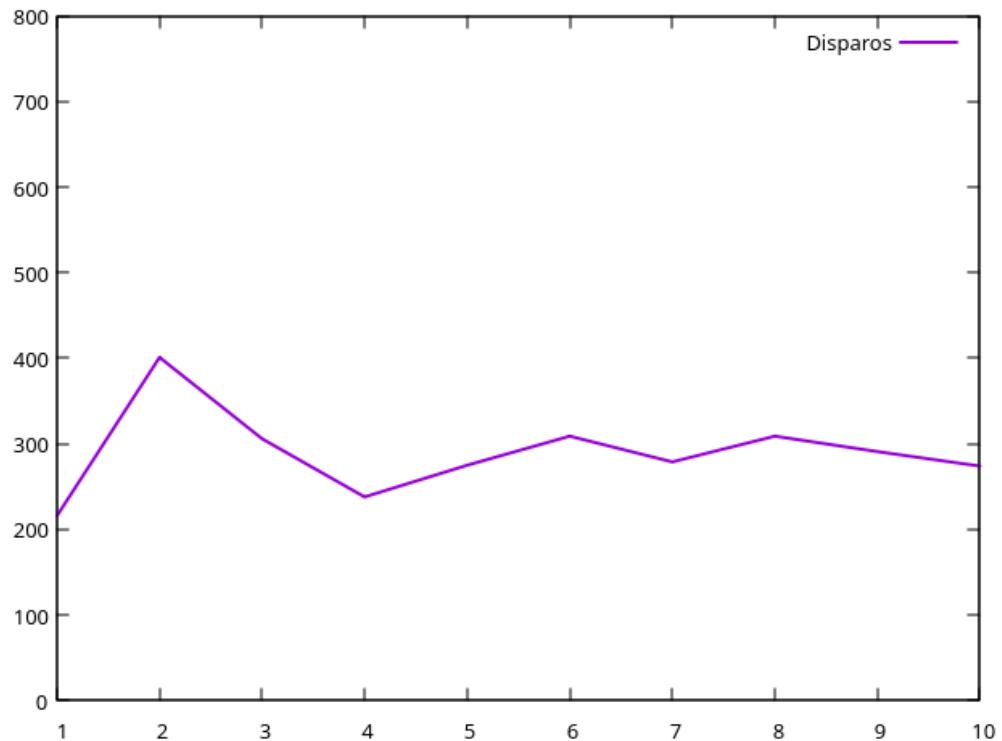


Figura 26: Disparos por  $t$ ,  $N = 800$  e  $n = 10$ .

## Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 23 0 0 0 44 131.3 46 0 137.35 77 0 0 119.4 121.6 67 41 62 0 75 47 0 58 99.6 0 60 0 0 145.9 102.85 44 131 0 0 56 44 88 0 0 162.07 0 52 0 84.15 182.54 0 0 55 50 110.6 61 77 0 107.35 0 0 67 66 103.95 16 59 106.1 0 0 0 120.05 43 38 0 0 47 128.7 45 103.05 48 0 59 0 0 0 0 53 139.65 0 0 63 0 67 117.5 127.05 121.1 0 91.1 49 121.45 0 96.9 0 45 126.7 82.65 124.3 0 0 106.25 0 39 0 0 76 75.8 78.3 153.06 73.95 0 54 51 71 191.15 0 0 88.4 78 0 85.25 0 82 103.65 0 148.6 67 107.5 0 87.05 0 56 49 115.45 42 99.45 37 0 0 123.85 80.4 0 118.75 0 71 0 36 120.6 83.6 51 111.35 104.4 0 118.6 0 0 186.78 58.1 175.63 0 121.25 63 61 53 0 137.25 0 0 53 0 0 122.1 55 64 0 71 163.15 0 58 53 0 144.6 0 60 113.9 132.85 0 101.8 0 177.64 97.2 51 0 0 0 0 63 67 0 160.47 58 0 62 40 0 103.3 147.3 0 108.65 0 0 0 0 54 99.75 51 101.8 122.45 93.1 0 0 0 39 0 120.75 47 0 59 79.95 184.12 75 0 21 45 0 164.79 0 0 72 42 139.95 106.2 0 83.35 0 102.15 62 116.45 100.05 0 90 22 0 0 69 28 113.15 58 0 74 39 44 0 67 0 74.4 0 108.8 43 109.05 96.4 123.35 0 112.05 41 108.4 60 0 78 0 135.45 68 55 0 0 130.5 0 138.78 30 87.95 106.6 38 84.05 0 102.35 0 0 0 38 0 0 67 51 0 0 36 49 74 119.25 98 66 70 34 63 67 125.15 113.35 0 0 62 117.75 89 0 119.15 141.6 126.95 88.8 153.8 113.75 48 61 109.3 0 43 39 0 0 136.95 0 47 0 0 27 0 69 66 0 0 161.35 79 0 89.6 60 0 84 0 0 127.2 48 118 0 107.45 175.58 0 97.65 128.05 60 117.6 123.8 72 71 0 37 0 0 0 53 51 58 0 0 98.55 39 31 0 179.94 0 0 0 86.95 46 101.65 199.48 138.55 42 125.15 118.05 0 52 0 0 45 0 102.05 56 120.65 60 0 36 59 65 0 0 102.35 0 0 50 0 43 69 77 0 78 0 0 118.75 115.8 76.15 62 107.25 111.6 57 114.8 39 0 0 0 0 33 68 0 105.25 57 0 54 0 149.65 106.35 0 0 59 42 61 82 114.55 0 0 69 54 52 0 55 0 0 69 35 0 127.3 89.4 48 124.75 0 71 0 0 99.35 133.16 55 46 130.05 144.71 0 99.7 68.9 85.8 0 67 71.15 0 0 88.9 36 65 50 125.1 0 0 63 0 161.41 54 23 59 0 77 111.2 30 48 66 0 82.6 54 0 103.8 107.1 130.4 0 95.85 52 104.05 49 0 30 80 51 58 90.9 115.4 117.1 0 192.26 0 0 112.5 107.25 0 67 0 66 59 0 0 160.7 64 141.45 0 57 49 130.9 156.4 169.59 0 0 48 0 0 54 164.54 0 48 57 111.95 57 60 75 44 0 0 98.75 0 37 59 42 99.7 105.45 0 67 136.95 0 39 125.16 0 38 41 27 29 89.2 117.1 50 43 55 44 64 41 100.25 0 77 84.75 112.65 55 0 0 127.9 171.37 87.25 32 0 126.9 99.9 110.05 79.5 74 0 147.23 86.8 102.9 150.7 116.95 0 0 66 82 0 71.25 104.6 48 47 0 0 102.1 52 115.7 148.6 133.5 0 122.65 94.35 171.75 61 0 46 116.42 0 0 0 0 0 106.1 111.15 0 108.95 129.25 38 57 57 42 0 51 105.3 44 131.65 54 56 0 0 0 65 67 165 55 0 51 62 0 0 48 67 97.6 72 64 0 38 48 110.5 0 40 0 70 0 78 74 129.45 108.2 0 0 47 109.2 61 77 60 113.2 0 68 55 132.94 0 194.37 36 52 60 0 0 49 63 0 0 0 122.3 55 0 66 63 81.7 52 73 38 117.05 148.59 0 59 59 24 121.45 47 0 47 40 0 153.8 0 0 55 166.1 71.55 52 133.5 0 54 0 140.8 126.05 45 0 0 186.52 110.45 156.63 96.1 125.8 97.1 110.8 101.65 0 51 0 90.15 77 0 0 117.8 112.35 0 85.95 0 54 0 0 133.35 0 40 0 0 0 120.7 0 0 95.9 115.05 0 0 121.25 0 164.87 0
- $V$  minimo durante a simulação: 0
- $V$  máximo durante a simulação: 243.09

### 3.4.2 100 interações

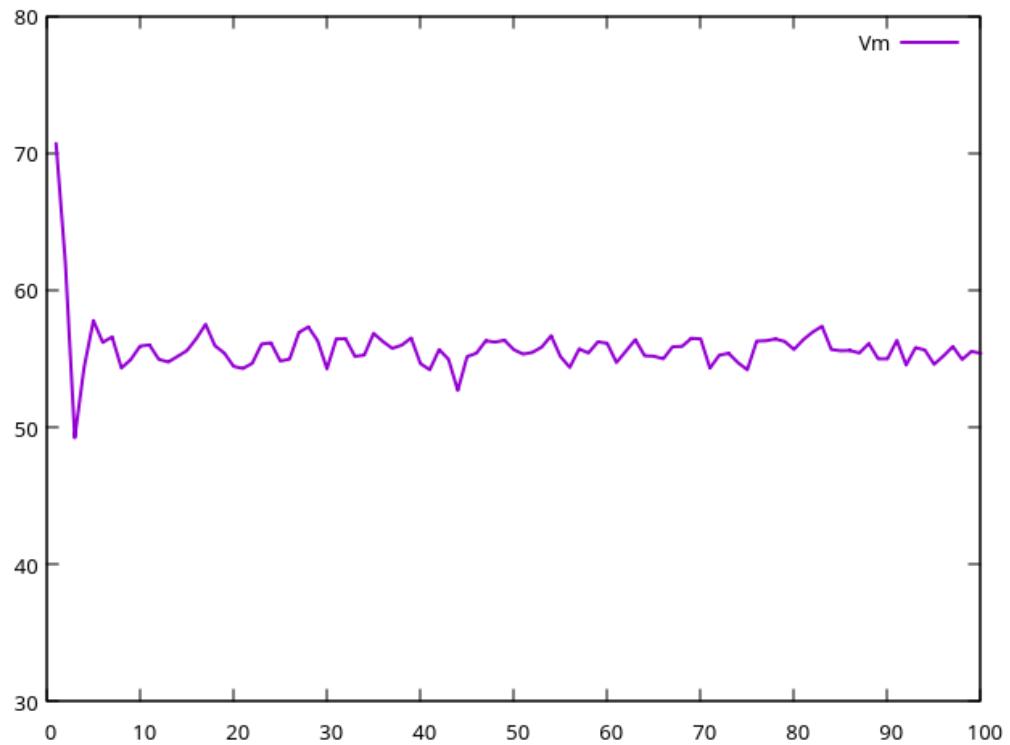


Figura 27:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 800$  e  $n = 100$ .

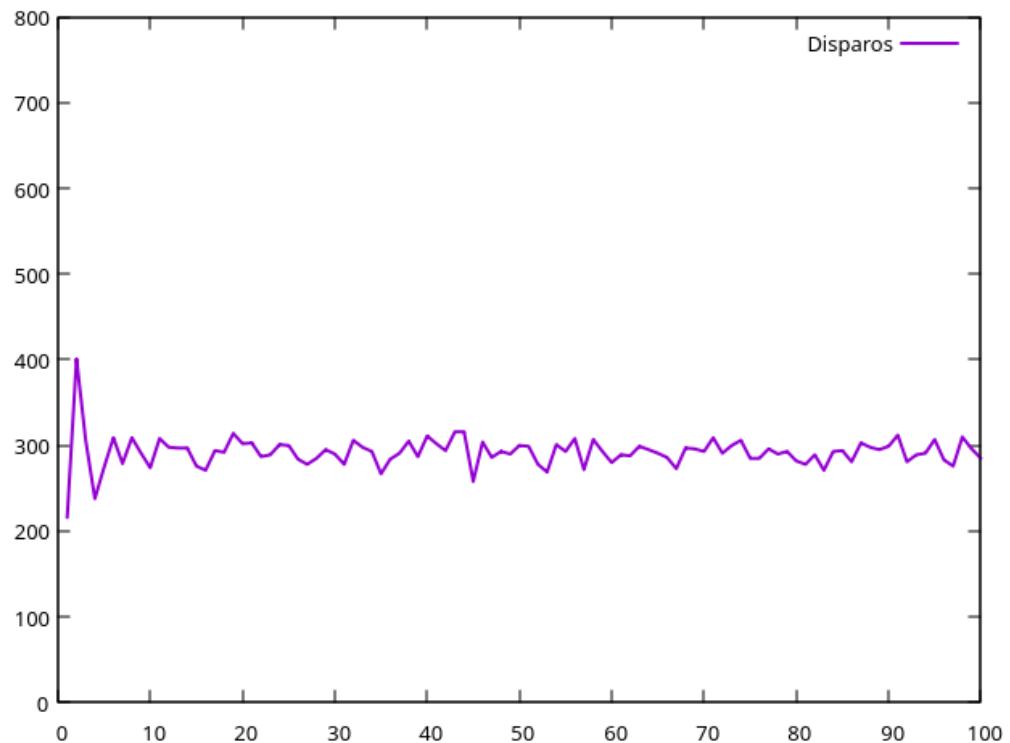


Figura 28: Disparos por  $t$ ,  $N = 800$  e  $n = 100$ .

## Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 79.5 0 135.15 0 99.85 0 56 0 0 102.05 27 56 70 0 68 170.68 28 58 64 0 0 70 46  
 113.3 0 0 0 75 75 0 0 0 114.9 96 0 136.25 72 0 41 0 54 98.6 0 0 0 158.85 55 104.3 91.6  
 111.35 61 0 0 0 56 123.8 82 0 0 115.75 48 0 99.45 50 63 0 144.4 0 221.4 0 54 0 51 0 0 0 52  
 0 45 142.37 150.43 0 0 137.35 135.01 51 0 129.2 94.5 101.2 0 0 113.85 77 0 63 0 0 162.16  
 68 87.4 135.1 0 0 49 0 120.4 0 0 0 73.05 117.4 173.88 18 61 158.3 45 0 124.75 68 129.85  
 96.75 58 0 0 0 0 0 74 0 45 0 41 59 71 40 97.3 115.75 172.54 63 0 145 0 13 60 0 121.35  
 135.1 77 0 0 43 113.5 136.25 107.05 44 201.1 0 48 0 48 68 120.1 47 66 68 0 0 0 0 0 0 0 0 0  
 0 145.7 96.9 0 0 136 67 62 58 0 29 62.5 138.1 127.1 0 0 0 46 0 103.9 48 111.1 53 89 76 61  
 0 149.95 53 63 43 61 0 0 106.9 0 0 91.8 76 57 54 117.65 50 122.2 0 79.55 35 0 0 77 128.05  
 68 72 0 102.4 64 59 0 62 0 75 0 0 144.6 105.5 87 67 0 0 0 0 0 106.25 66 121 103.79 77 0 18  
 78 46 0 51 61 125.9 58 58 0 66 94.55 0 0 53 0 0 0 100.4 56 174.35 94.85 0 132.05 48 110.49  
 113.5 0 0 0 78 38 0 145.25 138.9 114.8 87 65 56 89.75 57 0 0 107.7 133.7 61 114.2 161.6 43  
 54 37 120.85 38 184.9 0 83.45 0 0 0 58 0 58 0 50 76 131.56 0 113 132.2 135.2 56 69 97.8  
 90.85 0 0 0 0 59 104.9 117.15 95.75 0 0 155.81 0 0 34 83 39 48 54 101.65 149.53 0 0 65 0  
 94.25 0 0 0 0 65 0 82 101.95 94.3 64 17 0 0 67 60 63 0 0 109.65 65 0 50 0 69 53 37 67 44 0  
 0 0 49 57 0 53 45 66 63 53 203.2 0 0 42 0 70 75.4 0 43 0 72 65 138.01 0 0 51 79 125 0 59  
 0 80.9 126.9 68 74 67.45 0 120.55 205.81 0 46 104.3 0 69 118.6 0 103.55 47 0 152.18 46 72  
 40 0 66 118.35 106.95 52 94.75 66 108 0 0 0 126.25 67 51 90.75 68 0 180.09 117.65 0 0 0 0  
 0 117.25 113.05 67 49 42 170.59 69 72 0 123.55 50 107 41 0 97.7 0 118.9 0 40 0 48 83.3 59  
 107.5 87.9 0 60 84 55 108.79 56 0 0 167.93 47 44 48 107.78 0 0 25 68 57 135.3 133.2 86.1  
 0 84.15 0 63 45 88.05 0 69 0 175.2 63 65 38 71 0 0 81 102.75 97 0 76 141.25 0 57 101.75  
 122.35 80 65 0 0 65 69 0 86.35 92.6 109.85 47 118.05 150.7 0 135.66 0 0 66 0 0 56 0 77 0  
 0 80 56 0 0 0 85.3 130.65 62 0 87 115.65 77 44 0 96.15 0 0 0 57 0 0 0 75.25 109.8 0 155.12  
 46 58 61 0 70 128.2 78 110.25 48 0 122.75 48 29 129.65 109.3 133.65 74 40 0 81 51 76.95  
 78 0 217.32 0 38 0 38 0 91 46 0 0 106.9 73 0 25 0 139.25 60 65 69 0 0 0 60 70 146.7 45 0 0  
 94.3 0 158.56 53 131.55 73 40 38 0 0 43 0 49 123.65 0 106.3 109.55 0 51 104.15 69 71 60 0  
 29 100.05 128.7 43 45 39 0 69 61 0 0 74 126.85 163.37 144.55 0 70 113.15 0 103.35 71 59  
 115.1 0 133.9 59 53 0 116.3 116.55 0 166.79 0 59 0 100.15 50 45 131.33 56 0 72.35 78.75 0  
 116.2 0 0 0 125.5 112.1 0 110.25 0 192.06 0 59 132.35 0 0 36 128.7 79 0 150.57 0 0 129.3  
 138.95 0 0 110 26 0 98.75 0 114.1 51 42 129.1 0 0 110.1 0 71 53 0 83 0 52 0 85 79.1 111.25  
 59 70 61 53 0 0 0 126.95 0 66 60 0 43 0 65 108.95 51 0 84.15 88.05 116.4 132.7 0 68 52  
 119.55 0 72 121.4 120.15 179.31 0 64 0 0 0 96.8 156.6 118.49 68 112.35 45 0 0 204.69 0  
 105.1 108.15
- $V$  minimo durante a simulação: 0
- $V$  máximo durante a simulação: 256

### 3.4.3 1000 interações

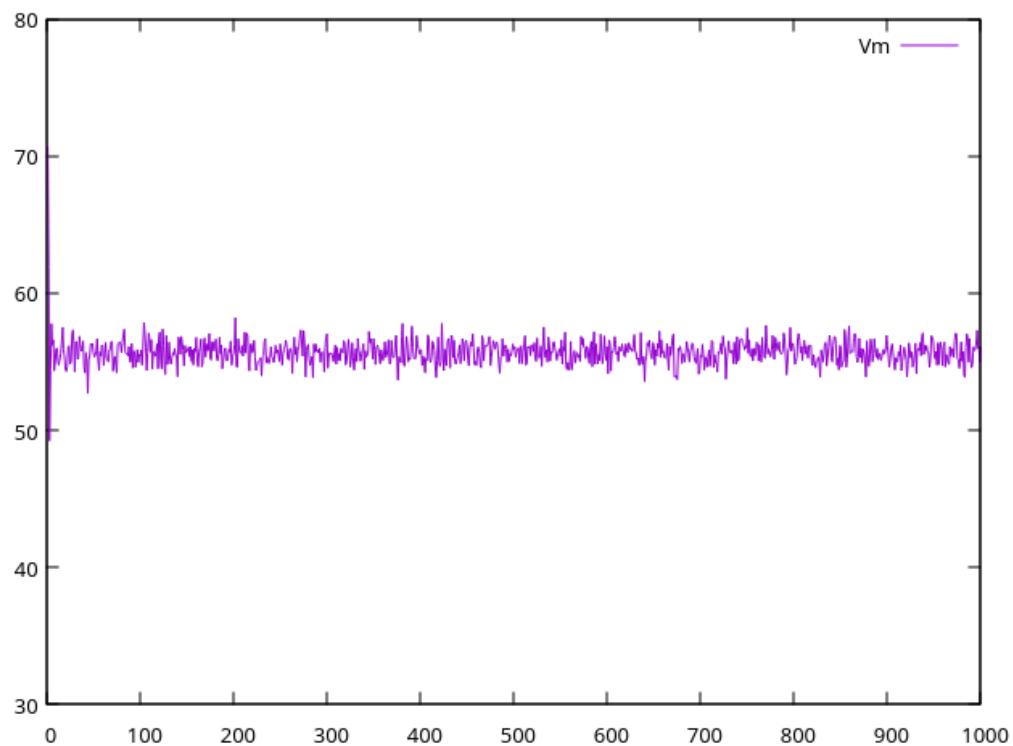


Figura 29:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 800$  e  $n = 1000$ .

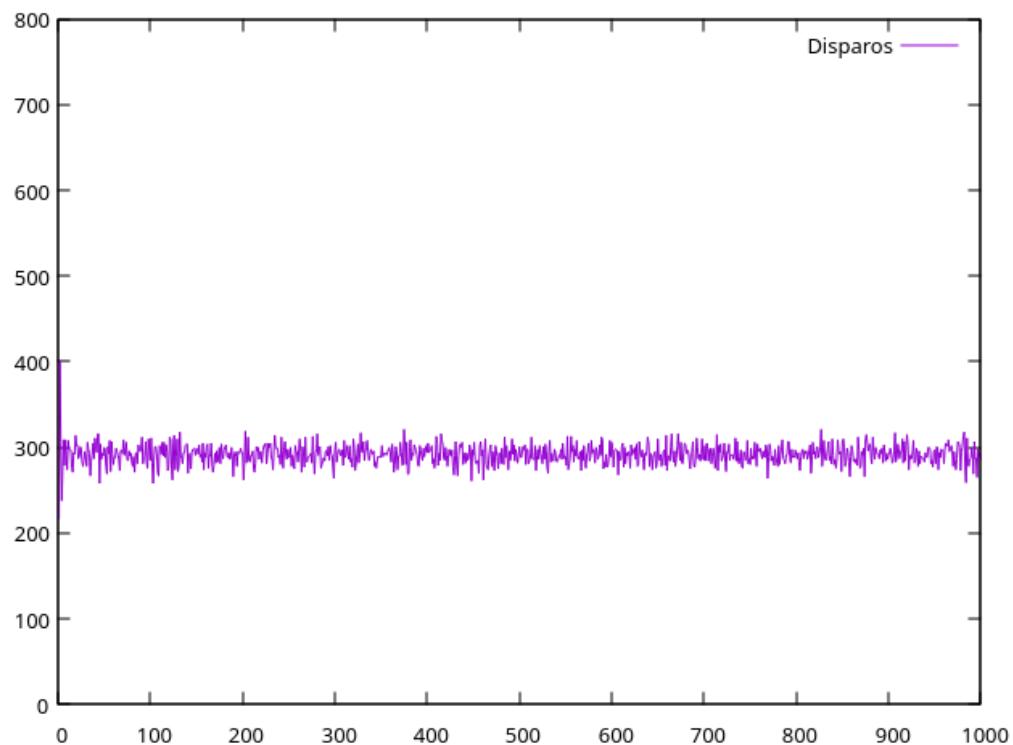


Figura 30: Disparos por  $t$ ,  $N = 800$  e  $n = 1000$ .

## Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 98.7 0 0 0 94.5 66 119.1 125.9 54 0 0 132.7 0 72 0 45 96.3 99.7 0 0 0 0 122.2 114.9 80 41 144.43 61 0 0 127.75 0 54 0 153.86 0 0 25 54 167.5 34 46 0 0 0 77 54 108.1 57 101.3 59 37 0 45 0 172.38 43 99.45 0 119.05 121.55 0 46 169.16 0 123.5 0 45 121.95 0 46 0 0 0 90.9 47 65 0 93.6 168 0 0 0 64 101.7 53 0 0 0 58 115.85 0 41 53 119.9 0 0 0 60 65 90.35 173.52 0 45 0 54 0 114.4 134.15 0 0 0 143.59 0 0 64 0 49 0 64 136.1 0 0 46 96.9 113.8 0 0 0 0 62 47 143.45 41 73 76 0 0 50 0 0 65 75 0 0 0 62 0 62 147.5 90.05 0 65 84.4 172.14 0 102.7 55 130.35 57 0 87.9 0 88.75 113.2 113.1 0 73 58 60 92.6 0 42 58 77 125.55 0 65 59 103.2 0 57 0 0 63 60 0 123.52 0 54 110.6 146.5 0 103.95 0 57 64 63 44 201.84 0 69 63 74 0 46 86.75 203.06 121.2 72 34 80 143.05 42 104.5 0 148.34 0 67 53 0 0 0 94.4 174.21 0 0 0 188.65 111.95 139.49 127.9 68 63 0 82 62 93.2 72 129.9 71 62 0 144 35 0 116.2 55 53 0 0 75 135.9 79.1 42 74 0 81.85 60 0 0 0 64 164.24 0 0 44 63 75 152.76 118.61 0 106 53 0 160.31 0 0 39 82.55 70 0 67 53 70 0 59 123.15 61 99.8 115.1 42 0 31 128.85 126.35 93.15 113.35 66 0 109.65 0 84.05 0 121.75 0 0 45 58 149.52 0 0 190.6 58 32 51 131.85 0 0 52 108.85 48 147.6 0 130.75 0 86.95 79 0 0 147.35 40 0 0 110.65 52 115.75 143.8 0 65 57 90.3 61 0 0 0 0 0 68 0 0 84.35 163.75 124.65 0 157.89 0 0 0 0 50 62 47 0 0 107.35 0 55 70 148.45 52 39 51 64 0 0 100.7 0 0 119.05 90 61 67 77 137.73 61 84.6 72 67 38 77 61 148.38 22 97 120.95 0 0 0 0 0 60 59 46 0 128.65 0 107 147.74 82 51 0 46 0 71 75.95 0 0 0 0 41 93.5 64 0 60 76 58 0 139.45 0 49 85 60 55 0 57 158.16 83 70 67 50 59 96.95 41 99.35 50 44 116.5 139.6 0 91.45 108.55 110.23 57 0 0 69 67 122.3 58 54 0 108.2 60 0 112.4 0 37 88.5 35 52 0 58 132.7 56 0 47 120.75 0 0 0 42 51 46 0 47 69.1 0 0 69 96.4 0 76 0 81.9 0 159.18 0 86 52 129.4 149.55 48 114.9 65 72 0 79 128 34 99.2 65 92 0 0 0 75 167.65 0 0 101.1 128.15 119.2 53 53 0 87 0 0 0 0 77 0 80 114.4 92 103.9 0 72 0 74 75 99.9 86.1 0 140.5 0 164.6 0 0 0 0 132.6 0 113.7 0 67 43 62 0 0 123.2 151.72 69 58 120.3 56 0 120.25 127.25 138 116 211.63 0 124.05 61 0 31 77.8 0 0 123.9 0 137.27 0 188.96 0 86.9 0 0 112.25 0 34 76 21 0 87 87.85 82.75 0 0 61 0 0 0 0 91 0 121.03 53 0 103.9 117.15 56 0 101.35 0 123.7 138.08 59 169.65 61 68 83.3 0 0 90.85 0 0 0 108.8 117.19 0 78 85 150.85 0 187.35 58 97.25 63 149.64 83.1 61 30 73 0 0 0 190.63 0 157.06 59 0 112.25 74 51 66 0 101.5 61.15 108.4 0 47 127.1 0 0 65 0 89.15 0 139.1 159.51 82.85 0 58 0 0 121.8 0 47 30 102.25 139.7 0 70 45 119.55 0 52 56 113.4 0 60 59 76 53 109.53 44 59 99 73 0 60 69 55 68 127.85 0 65 77 117.15 0 60 0 0 122.35 120.6 87.05 112 96.4 0 101.6 0 142.2 0 52 92.35 147.75 67.5 0 0 71.2 0 0 22 58 70 74 139.75 0 0 58 85 77 112.25 0 157.78 57 0 70 0 0 77 51 53 0 56 143.05 61 59 42 112.6 45 0 120.75 58 0 0 0 0 0 149.35 133.65 45 55 66 102 0 0 103.15 53 0 75.45 0 0 0 0 76.45 113.45 0 0 71 107.15 136.5 0 0 102.65
- $V$  minimo durante a simulação: -12
- $V$  máximo durante a simulação: 291.85

### 3.4.4 5000 interações

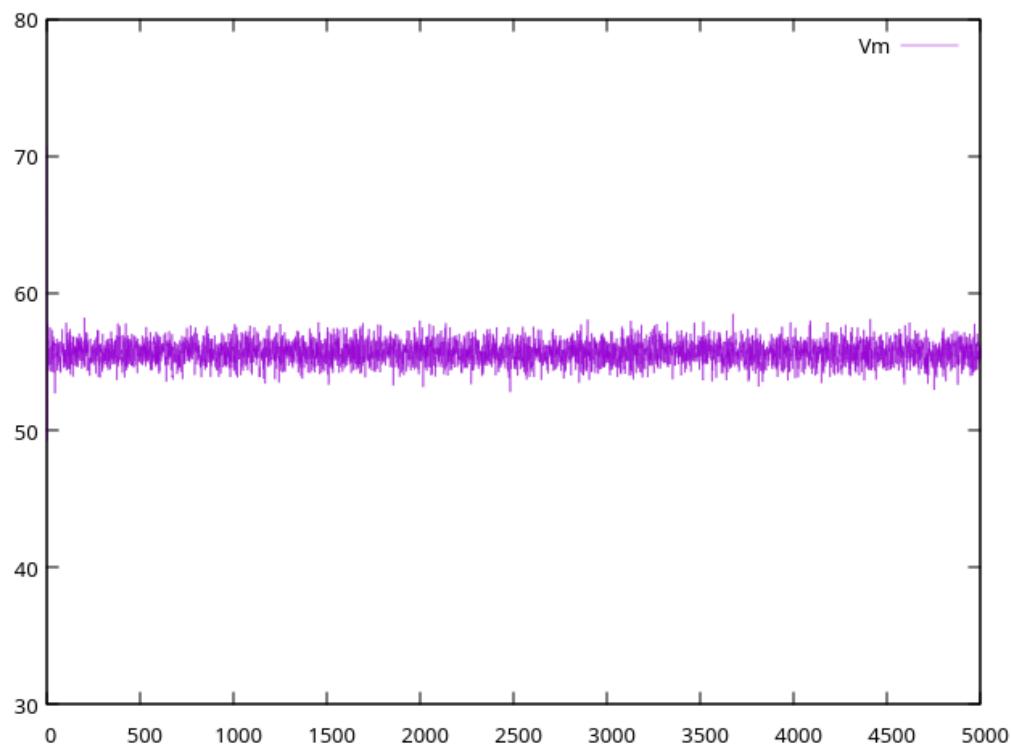


Figura 31:  $V_m$  por  $t$ ,  $N = 800$  e  $n = 5000$ .

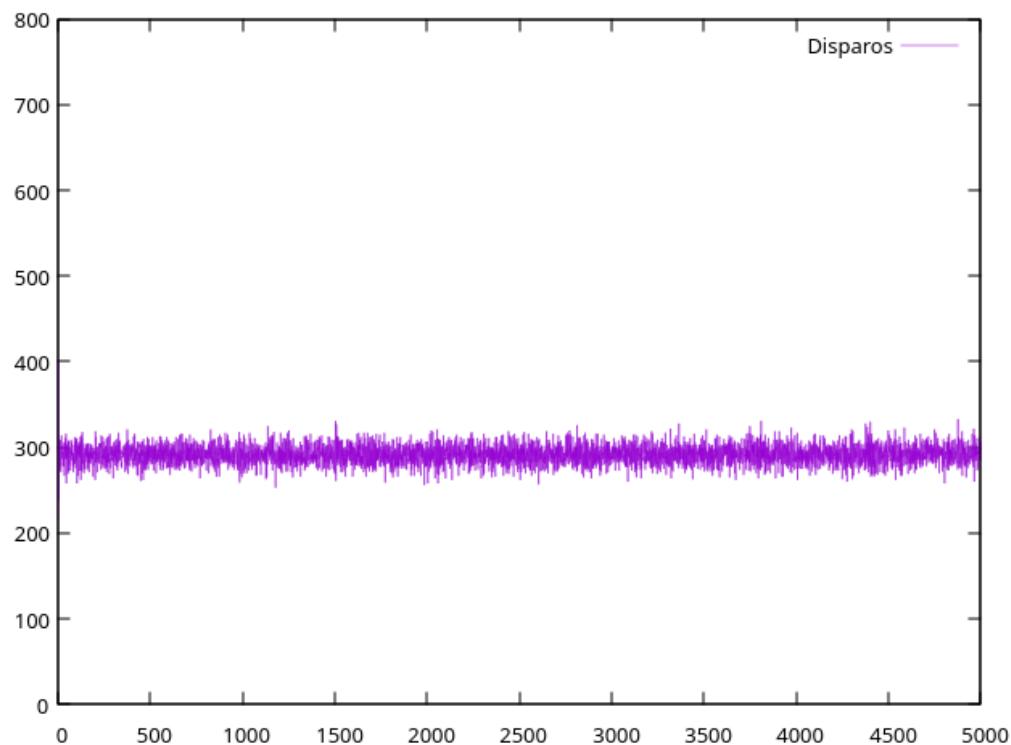


Figura 32: Disparos por  $t$ ,  $N = 800$  e  $n = 5000$ .

## Potenciais Finais:

- $V$ 's final: 0 79 141.3 0 64 52 0 0 72 55 73 0 63 0 0 59 0 0 0 0 48 45 0 143.8 0 94.05 76.45  
 73 0 88.65 0 0 0 0 0 101.75 101.9 94.45 45 0 122.15 0 31 0 83 107.75 44 47 0 65 83.6 0 0  
 0 77 0 65 0 144.2 56 95.45 0 60 0 128.31 0 55 0 0 0 73 50 0 0 0 0 68.3 0 0 63 149.4 0 0 51  
 169.16 0 0 101.3 117.35 0 136 106.15 0 0 52 125.35 0 130.45 116.6 104.33 0 90.65 109.35  
 42 58 129.15 134.1 0 72 0 118.55 98 44 130.25 0 0 36 127.35 0 50 0 66 0 0 115.55 132.4 42  
 151.45 0 113.85 126.65 0 59 167.48 82 0 0 62 0 119.5 0 0 0 0 43 0 0 83 0 52 0 65 44 125.35  
 100.9 47 0 0 0 0 0 116.15 0 70 75 63 0 120.25 0 140 121.75 0 79 0 67 0 123.15 68 76 0  
 91 112.15 56 0 83.05 128.64 62 0 73 86 123.95 72 0 148.72 115.6 58 0 135.3 79 134.4 0 0  
 99.5 0 107.3 0 0 65 56 0 78 36 117.25 125.55 0 0 59 0 0 101.4 0 164.03 0 58 135.55 0 135.6  
 125.65 108.6 0 0 142.44 0 0 157.1 99 0 147.6 0 194.87 179.44 0 67 58 0 0 42 152.65 74 0 0  
 39 118 61 41 45 0 37 70 205.88 135.2 0 0 77 152.61 0 0 66 0 0 112.5 0 0 51 0 73 110.05 39  
 0 137.76 0 66 91 0 140.15 0 0 68 119.45 117.3 0 44 0 0 30 116.65 64 51 60 108.5 0 0 92.25  
 118.1 61 65 45 0 111.35 54 86 74 93.95 0 0 0 72 42 72 41 70 83 53 0 142.57 98.05 101.1  
 107.65 205.76 63 0 0 132.15 46 64 132.2 0 132.35 63 148.8 198.05 132.7 77 71 0 51 55 0  
 0 0 50 0 0 0 54 122.6 161.6 0 0 43 0 0 55 76 0 60 50 165.12 75 0 0 0 65 37 125.7 67 46 0  
 0 136.15 0 131.45 142.5 62 53 0 54 70 0 79.9 0 134 120.75 94.1 0 69 111.19 47 64 165.49  
 123.15 0 48 33 0 0 73 0 0 0 52 37 66 128.65 75 0 113.6 173.68 95 0 27 130.85 134.95 74 0  
 49 131.25 60 0 0 27 0 105.7 0 78 116.7 47 0 0 66 80 54 99.9 60 69 0 0 0 0 32 75 0 72 57  
 0 162.7 54 0 0 131.18 104.3 0 0 0 112.2 74 171.58 54 174.97 121.5 0 167.01 203.98 183.7  
 116.4 36 45 102.15 35 39 133.27 0 52 75 207.37 90.65 0 190.28 52 48 58 0 83 41 0 0 45  
 133.6 151.37 0 0 0 137.45 61 76 58 0 60 73 64 54 0 138.45 94 48 176.51 110.3 81 136.45  
 130.75 73 54 55 139.8 52 90 41 62 0 0 0 52 0 115.85 79 143.86 100.95 114.15 124.05 43 0 0  
 0 0 0 67 0 63 49 0 63 0 100 0 68 65 57 62 0 113.95 63 65 0 72 124.95 44 67 108.65 152.13  
 75 0 167.5 133.75 0 0 0 0 0 0 0 52 0 92 122.05 0 52 0 81 58 167.31 34 0 101.55 67 0 0  
 75.8 66 54 0 0 81 90.95 62 109.65 0 169.97 82 0 56 65 46 0 119.35 0 70.75 97.75 0 78 0 0  
 158.05 63 0 66 65 138.3 47 109.2 39 0 69 127.35 82 0 42 0 105.45 169.65 84 0 0 38 71 0 0  
 187.94 81 160.56 123.9 67 0 0 75 48 53 0 99.9 51 0 0 49 147.95 0 0 0 0 0 133.55 0 118.1 35  
 0 82.2 86 0 115.25 71 0 0 100.2 137.45 120.85 82 0 106.75 78 124.55 0 177.88 65 0 59 82  
 0 82.4 131.86 0 0 0 50 54 72 0 77 0 0 142.9 0 70 0 67 61 0 135.6 0 58 67 0 0 0 81 63 0  
 74 64 88.9 125.3 61 0 132.05 69 0 54 124.35 0 59 0 140.85 174.5 0 0 191.98 0 0 47 84 90 0  
 44 147.2 74 52 0 61 0 54 50 100.35 0 0 61 0 139.95 0 64 74 0 0 69 0 61 0 50 161.41 56 0  
 79.35 84 0 23 58 63 0 73 97.6 0 116.8 0 129.35 60 202.32 109 0 62
- $V$  minimo durante a simulação: -12
- $V$  máximo durante a simulação: 299.24

## 4 Discussão

### 4.1 800 neurônios

Podemos perceber que, a partir das Figuras da subseção 3.4, o potencial médio e a quantidade de disparos estabilizaram nas primeiras interações e se mantiveram até  $t = 5000$  quando a quantidade de neurônios era 800.

Os disparos estabilizaram-se em torno de 290, valor não tão distante do  $800 \cdot p_e = 240$ .

O potencial médio estabilizou-se em torno de 55, valor não tão distante do  $\varphi^{-1}(p_e) \approx 55.85$ .

### 4.2 300 neurônios

Podemos perceber que, a partir das Figuras da subseção 3.3, o potencial médio e a quantidade de disparos estabilizaram nas primeiras interações e se mantiveram até  $t = 5000$  quando a quantidade de neurônios era 300.

Os disparos estabilizaram-se em torno de 110, valor não tão distante do  $300 \cdot p_e = 90$ .

O potencial médio estabilizou-se em torno de 20, valor não tão distante do  $\varphi^{-1}(p_e) \approx 20.9$ .

### 4.3 100 neurônios

Podemos perceber que, a partir das Figuras da subseção 3.2, o potencial médio e a quantidade de disparos estabilizaram nas primeiras interações e se mantiveram até  $t = 5000$  quando a quantidade de neurônios era 100.

Os disparos estabilizaram-se em torno de 37, valor não tão distante do  $100 \cdot p_e = 30$ .

O potencial médio estabilizou-se em torno de 6.5, valor não tão distante do  $\varphi^{-1}(p_e) \approx 6.9$ .

### 4.4 70 neurônios

Podemos perceber que, a partir das Figuras da subseção 3.1, o potencial médio e a quantidade de disparos estabilizaram nas primeiras interações e se mantiveram até  $t = 5000$  quando a quantidade de neurônios era 70.

Os disparos estabilizaram-se em torno de 23, valor não tão distante do  $70 \cdot p_e = 21$ .

O potencial médio estabilizou-se em torno de 4, valor não tão distante do  $\varphi^{-1}(p_e) \approx 4.8$ .

### 4.5 Conclusão

Nota-se que a fórmula de  $\varphi$  encontrada satisfaz os intutitos iniciais.