

## Introdução – O que são células de grade?

Neste trabalho estudou-se um modelo da classe de atratores contínuos proposto por Burak & Fiete (2009)[1] de como ocorre o comportamento das células de grade em uma rede neural. As células de grade são um tipo de neurônio descoberto no córtex entorrinal de ratos em 2005 por Edvard Moser e May-Britt Moser[2] no estudo de como o cérebro realiza a interpretação da localização espacial desse animal. Esses neurônios despertaram a curiosidade dos pesquisadores por apresentarem um comportamento de atividade neural em formato hexagonal conforme o rato se movia em um certo espaço (Fig. 1). O nome célula de grade foi dado baseando-se no fato de que o formato dos disparos gera um desenho que se assemelha a uma grade (Fig. 2).

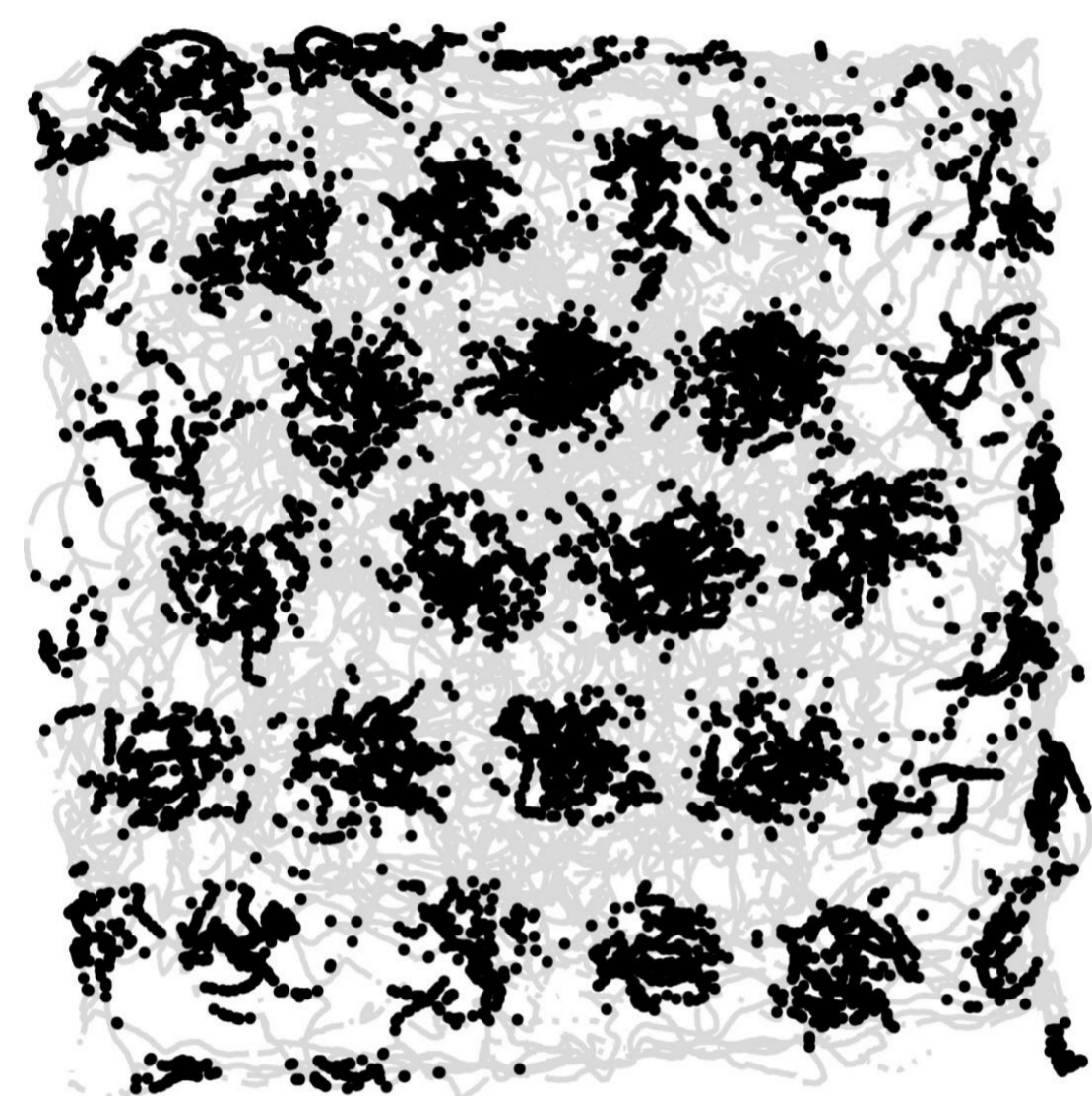


Figura 1

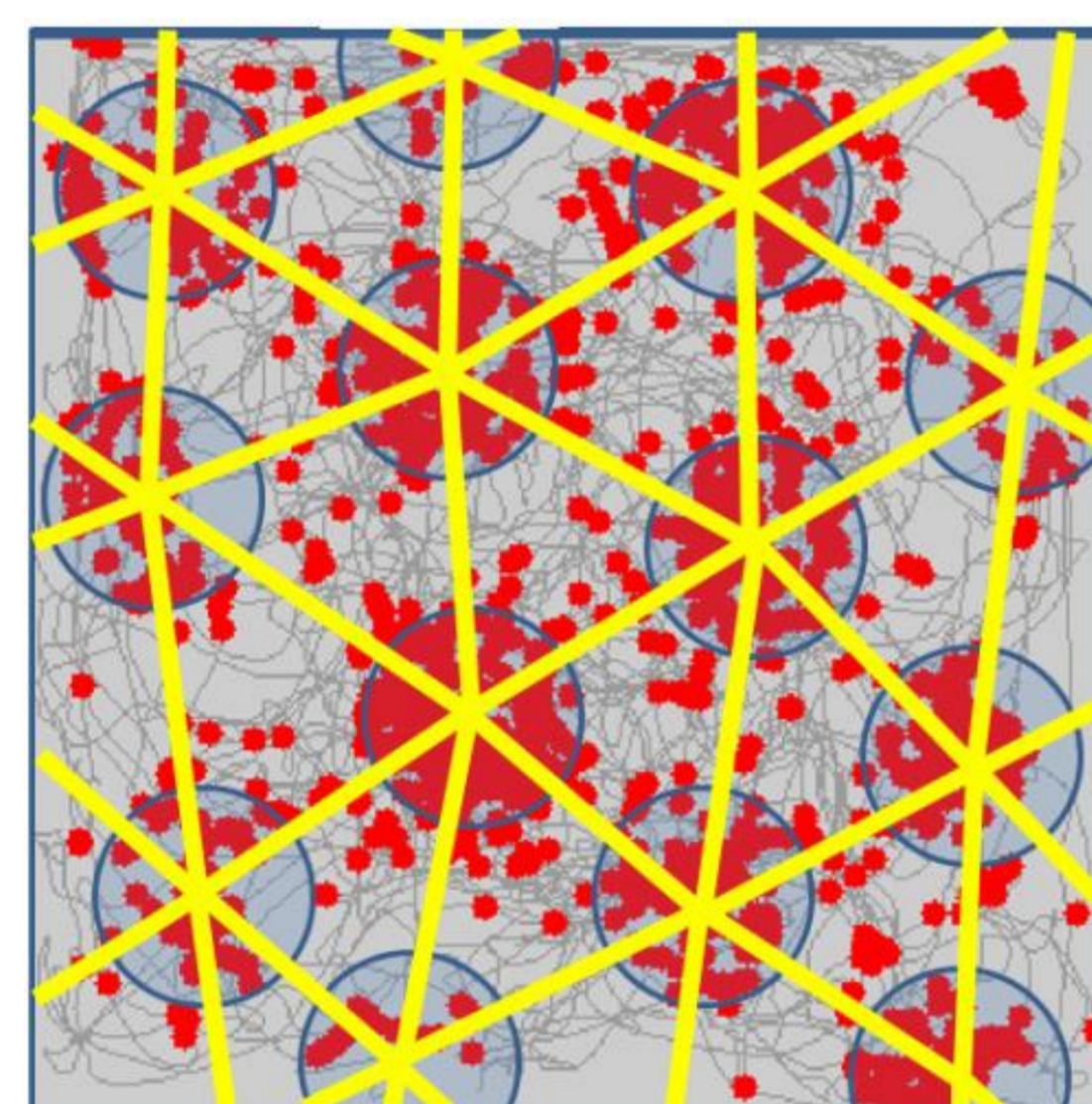


Figura 2

**Figura 1** Preto: Pontos em que ocorreram disparos do neurônio; Cinza: trajetória do rato. Retirada de [3]; **Figura 2** Cinza: trajetória do rato; Vermelho: Locais de disparo do neurônio; Amarelo: Aparente forma de grade dos conjuntos de disparos. Retirada de [4].

## O modelo – Definições matemáticas

O modelo matemático proposto por Burak & Fiete (2009)[1] resume-se, principalmente, à utilização de uma equação diferencial que explica a relação e o comportamento entre neurônios de uma rede neural contendo  $n \times n$  neurônios em uma espécie de caixa 2D. Essa equação é:

$$\tau \frac{ds_i}{dt} + s_i = f \left[ \sum_j W_{ij} s_j + B_i \right]$$

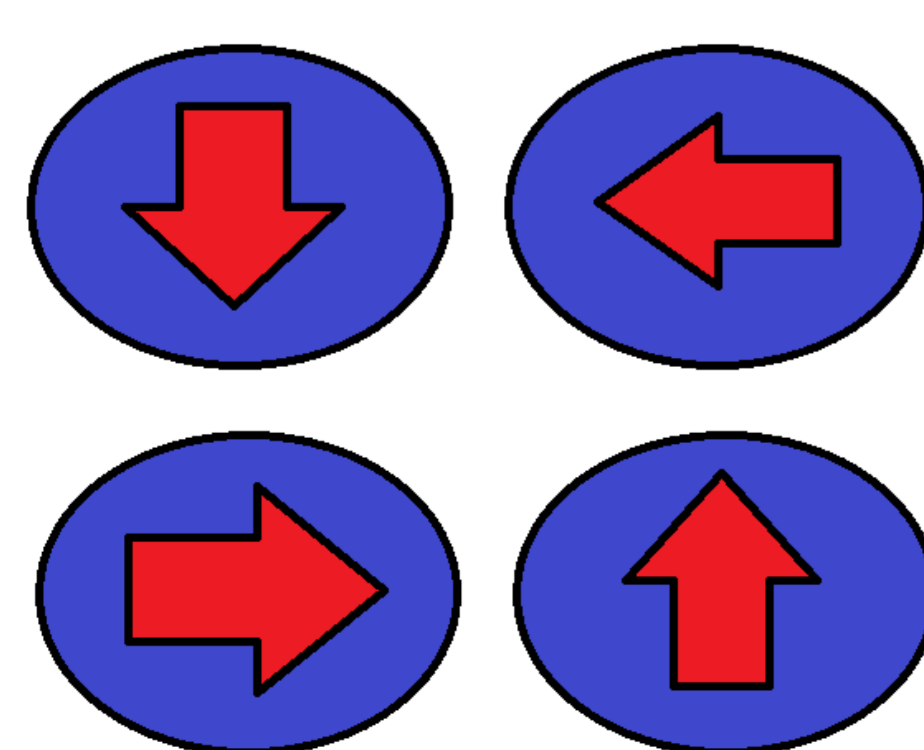
Onde  $\tau$  é a constante temporal de resposta de um neurônio,  $s_i$  é a ativação sináptica do neurônio “i”, a função  $f$  é uma função em que  $f(x) = x$  se  $x > 0$  e  $f(x) = 0$  se  $x \leq 0$ , onde  $B_i$  equivale ao estímulo externo e  $W_{ij}$  é a matriz de pesos sinápticos entre os neurônios “i” e “j” tal que:

$$W_{ij} = -\tanh(d - W_{width}) \left( \frac{W_{top} + W_{bottom}}{2} \right) - W_{width} + \left( \frac{W_{top} - W_{bottom}}{2} \right) + H[x - 2W_{width}] e^{-(d - 2W_{width})}$$

Onde as constantes utilizadas em  $W_{ij}$  foram  $W_{top} = 0$ ,  $W_{bottom} = 0,07$ ,  $W_{width} = 8$ ,  $d$  equivale a distância na rede entre os dois neurônios. A expressão para o  $B_i$  (estímulo externo) é:

$$B_i = A(x_i)(1 + \alpha \hat{e}_{\theta_i} \cdot v)$$

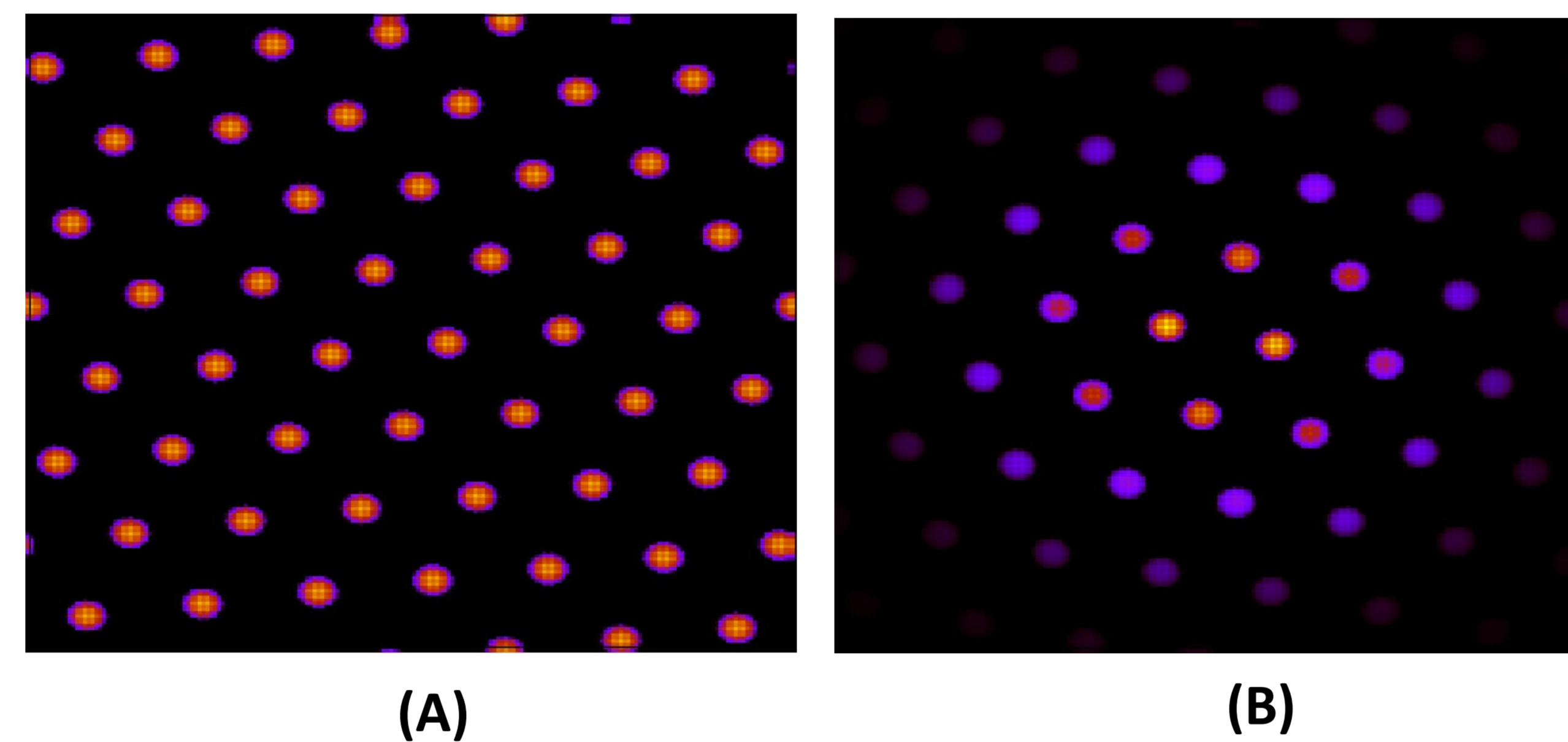
Onde  $\alpha = 1$ ,  $\hat{e}_{\theta_i}$  é o vetor que indica a direção da trajetória do rato e  $v$  é a velocidade com que o rato percorre a trajetória. Além disso, para esse trabalho, cada neurônio da rede recebeu uma direção preferencial que pode ser em quatro direções correspondentes às direções da rosa dos ventos (norte, sul, leste e oeste). Essas direções preferenciais são organizadas de forma que neurônios próximos formem um padrão semelhante a um catavento (Fig 3.):



**Figura 3:** Direções preferenciais de neurônios próximos

## A rede – Características e defeitos

O modelo de Burak & Fiete (2009), basicamente, considera uma rede de  $n^2$  neurônios que recebem um estímulo externo excitatório e se inibem mutuamente dependente da sua distância. Para o comportamento na borda, o modelo propõem dois tipos de redes: Primeiramente um modelo aperiódico, cujos neurônios mais próximos das bordas da rede recebem menos estímulo externo até este ser zero; Na versão periódica do modelo a atividade neural é capaz de “atravessar” as bordas da rede, de forma que a rede apresenta um formato de tórus. Para os tipos periódico e aperiódico padrões estáveis de atividade foram obtidos por simulações computacionais utilizando a linguagem C-CUDA (Fig. 4).

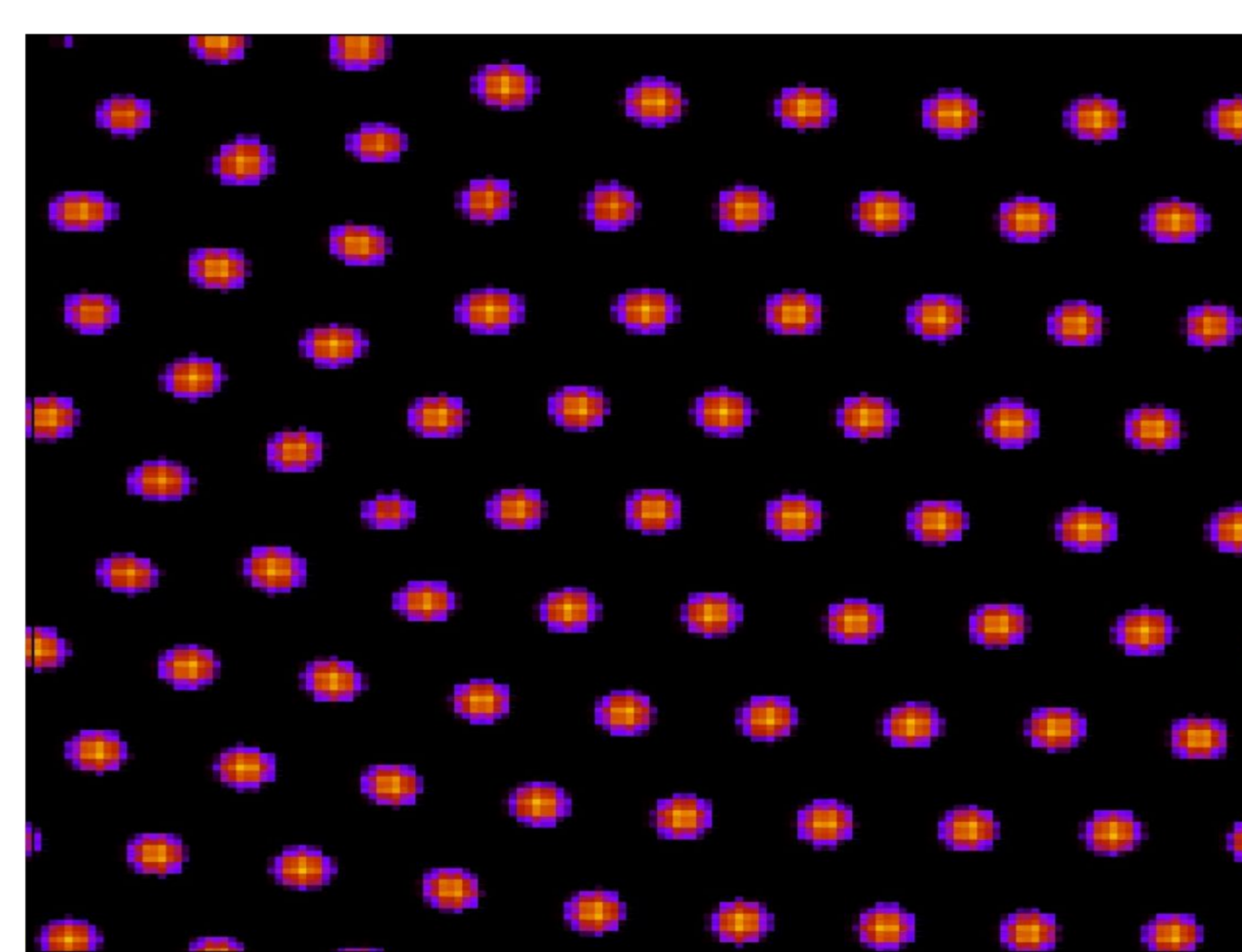


(A)

(B)

**Figura 4.** Condições de contorno das redes. (A) Rede neural periódica; (B) Rede neural aperiódica.

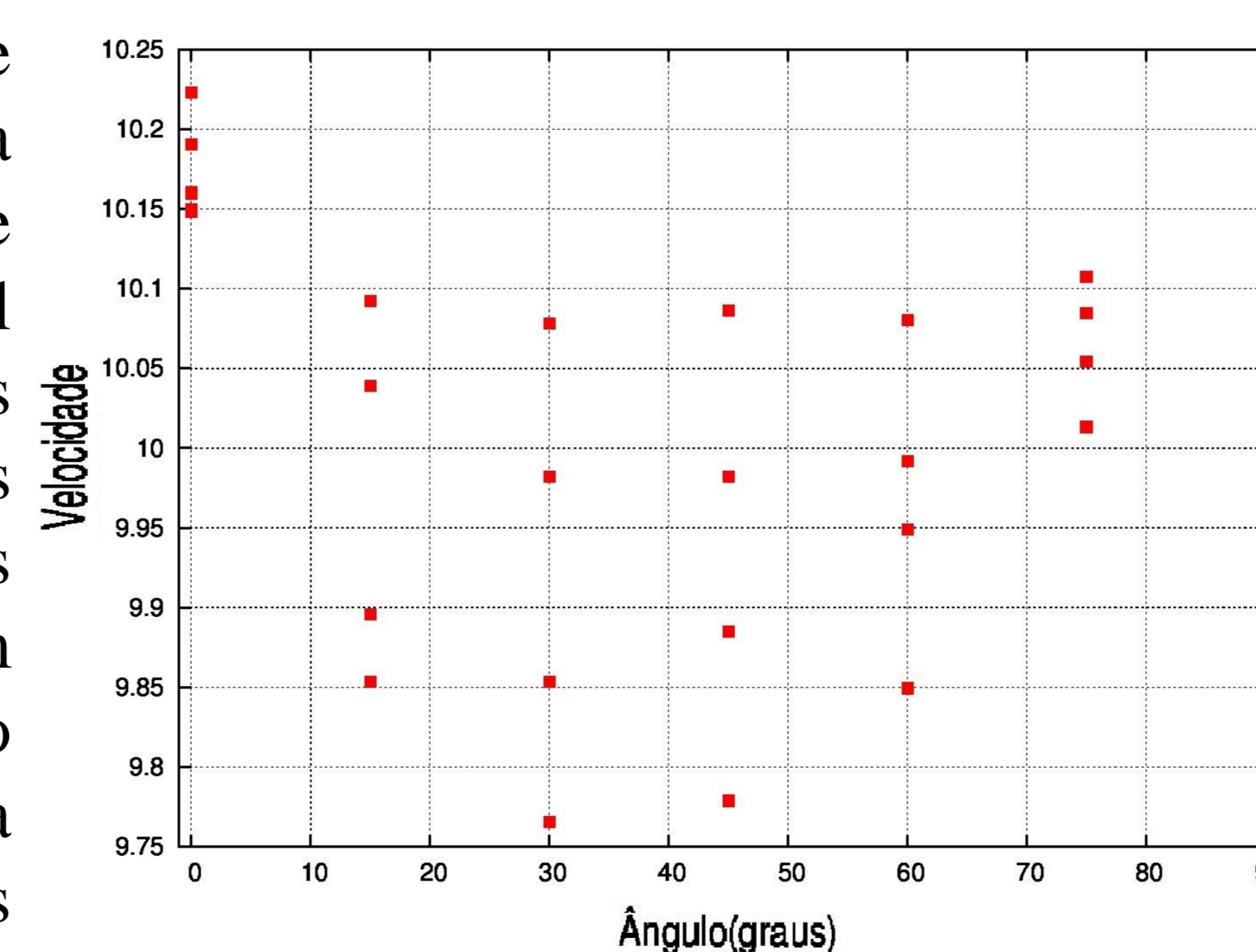
Dessa forma na equação de  $B_{ij}$  (estímulo externo) a função  $A(x)$  depende do tipo de rede, cujo qual para a rede periódica  $A(x) = 1$  e para a rede aperiódica  $A(x) = \exp[-a_0(\frac{|x| - R + \Delta r}{\Delta r})^2]$ , onde  $a_0 = 4$ ,  $R$  é o diâmetro da rede e  $\Delta r$  é um coeficiente de quantos neurônios terão sua atividade diminuída na rede aperiódica. Uma característica marcante das diferentes possíveis condições iniciais foi observada com relação a rede periódica, que em certos casos, com a evolução do tempo, não era capaz de se estabilizar e apresentava defeitos em certas regiões (Fig. 5).



**Figura 5:** Defeitos observados em uma simulação para certas direções preferenciais.

## Velocidade para diferentes trajetórias

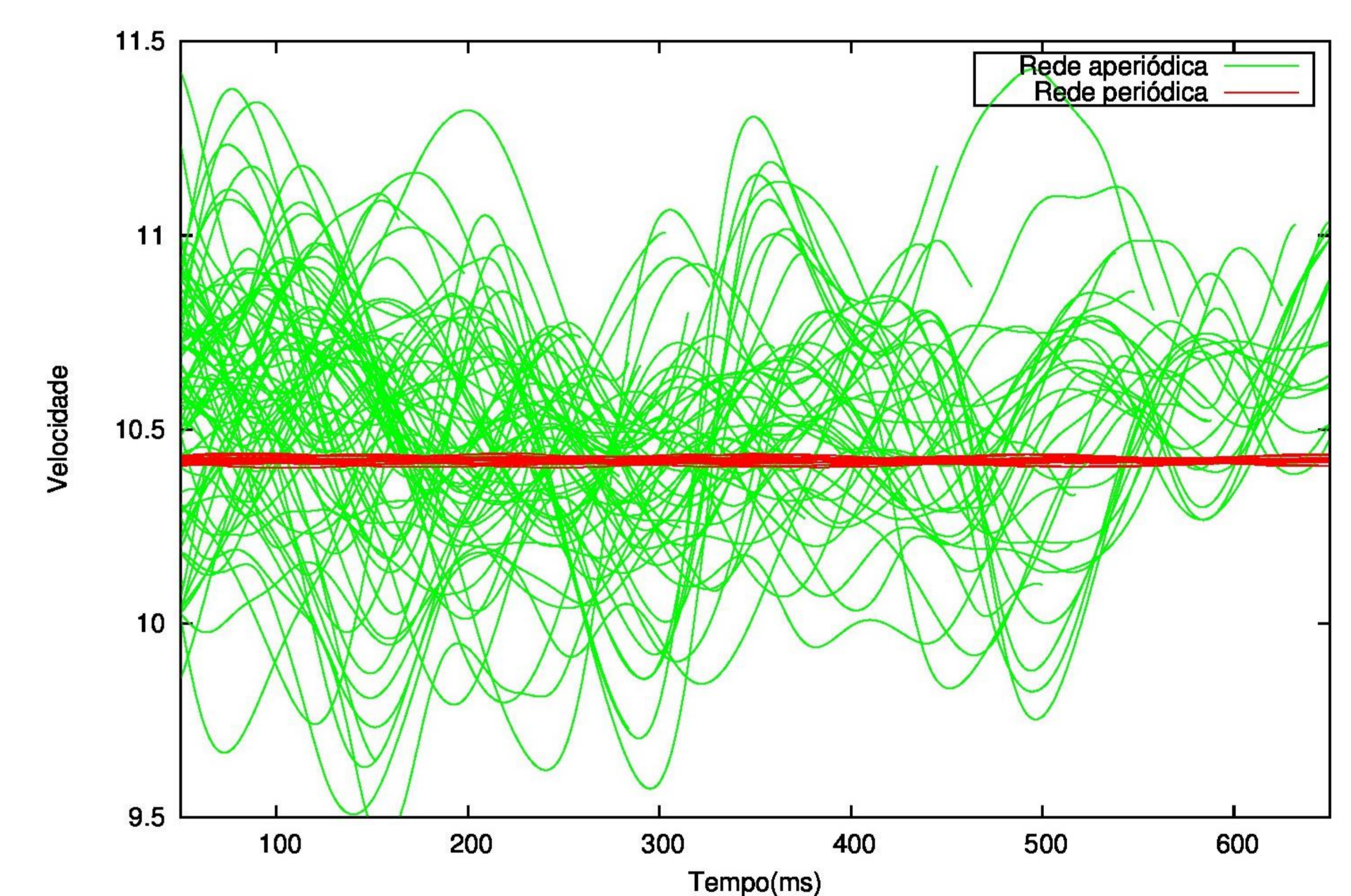
Analisando os resultados das simulações estáveis periódicas implementadas, foi-se calculado o centro de atividade de cada pico de atividade e então acompanhado seu movimento na rede para diferentes trajetórias percorridas pelo rato, sendo assim possível a análise da velocidade desse centro. As trajetórias equivaliam a linhas retas em diferentes direções, de forma que cada trajetória tinha um ângulo diferente com um certo referencial X-Y definido. Para as velocidades terminais nessas diferentes trajetórias foi observado (Fig. 6) um padrão de simetria em torno do ângulo de 45° de forma que as maiores velocidades ocorriam nos ângulos de 0° e 90°, pois essas são direções preferenciais dos neurônios.



**Figura 6:** Velocidades terminais para diferentes ângulos de trajetória do rato

## Velocidade em diferentes redes

Para a evolução da velocidade dos centros de atividade, conforme o rato realizava sua trajetória, foram observados comportamentos diferentes para os dois tipos de rede: A rede periódica apresentou um comportamento bastante linear e pouco oscilatório, mostrando-se capaz de integrar de forma eficiente a trajetória real do rato. A rede aperiódica, por outro lado, apresentou um comportamento bastante oscilatório da velocidade, demonstrando-se bastante ineficiente para essa análise. Esse efeito observado na rede aperiódica pode, de certa forma, ser explicado pela extinção e nascimento de diferentes picos de atividade conforme um destes se aproxime da borda (já que quanto mais próximo da borda, menor sua atividade), causando assim uma resposta em toda a rede. Entretanto é interessante que a velocidade dos centros na rede aperiódica oscile em torno da velocidade na rede periódica (Fig. 7).



**Figura 7.** Evolução das velocidades dos centros de disparos: Cada linha representa a evolução de um centro de disparo. (Verde) Rede aperiódica; (Vermelho) Rede periódica

## Discussão e conclusão

Após o trabalho foi possível observar que o modelo periódico é melhor que o modelo aperiódico na integração de velocidade. As oscilações observadas na velocidade no modelo aperiódico indicam que a borda da rede ainda influencia a velocidade mesmo com modulação do estímulo de entrada. O modelo periódico, por outro lado, apesar de bom na integração, pode apresentar grades irregulares o que indica que melhores mecanismos de estabilização talvez sejam necessários nesse tipo de rede.

## Referências

- Burak, Y. & Fiete, I.R. *Accurate path integration in continuous attractor network models of grid cells.* PLOS Comput. Biol. 5, e1000291 (2009)
- Hafting, T., Fyhn, M., Molden, S., Moser, M.-B. & Moser, E. I. *Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex.* Nature 436, 801–806 (2005).
- <http://www.ntnu.edu/kavli/discoverin-g-grid-cell> consultado em 23/09/2015
- <http://derdiklab.technion.ac.il/Derdikman/UploadFiles/PGallery/9579486766.jpg> consultado em 23/09/2015

## Agradecimentos:

