

# TRANSIÇÕES DE RITMOS EM CPGs ARTIFICIAIS VIA ACOPLAMENTO NEURAL GENERALIZADO

**Marlon V. Rocha, Felipe M. G. França**

COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
{mvrocha, felipe}@cos.ufrj.br

**Priscila M. V. Lima**

DEMAT, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
priscilamvl@ufrj.br

**Resumo** – Aos chamados CPGs (*Central Pattern Generators*), estruturas neurais baseadas em neurônios inibitórios auto-acoplados, são atribuídos a geração de padrões rítmicos de caminhada em animais dotados com múltiplos pares de pernas. A modelagem de CPGs artificiais de Yang e França é baseada na dinâmica de multigrafos SMER (*Scheduling by Multiple Edge Reversal*), que pode ser reproduzida por pares de neurônios analógicos conectados sob uma forma generalizada da arquitetura de Hopfield, através da inclusão de conexões do tipo  $w_{ii} \neq 0$  em cada neurônio  $i$ . Este trabalho introduz uma generalização deste tipo de acoplamento neural, permitindo o disparo de transições entre ritmos diferentes que não violem restrições anatômicas. Um hexápode foi escolhido como estudo de caso e, como cada ritmo característico possui uma representação SMER particular contendo um mesmo número de vértices, mostraremos que, conseqüentemente, cada mapeamento neural correspondente possui o mesmo número de neurônios, mas com diferentes padrões de conectividade.

**Palavras-chave** – Atratores dinâmicos, CPGs, SMER.

**Abstract** – The generation of rhythmic gait patterns in animals having multiple pairs of legs are produced by the so-called CPGs (*Central Pattern Generators*), neural structures based on self-coupled inhibitory neurons. Yang and França's artificial CPGs modeling is based on the SMER (*Scheduling by Multiple Edge Reversal*) multigraph dynamics, which can be reproduced by pairs of analog neurons connected as a generalized Hopfield architecture, through the inclusion of  $w_{ii} \neq 0$  connections at each neuron  $i$ . This work introduces a generalization of this type of neural coupling, allowing for the triggering of transitions between different rhythms that does not violate anatomic constraints. A hexapod was chosen as case study and, as each particular rhythm has a particular SMER representation, all having the same number of vertices, it will be shown that, consequently, each corresponding neural mapping have the same number of neurons, but with different connectivity patterns.

**Keywords** – Dynamic attractors, CPGs, SMER.

## 1. Introdução

Um animal dotados de pernas pode se locomover usando padrões rítmicos diferentes, sendo cada ritmo associado a um compromisso entre velocidade e tração definido por uma dada situação, analogamente às diferentes relações de marchas existentes em um automóvel. Os interesses em; (i) se explicitar as funcionalidades de CPGs no âmbito biológico, incluindo a adaptabilidade observada dos movimentos rítmicos dos animais ao caminhar em terrenos irregulares, e; (ii) o desenvolvimento de robots que herdem estas capacidades, constituem as principais motivações deste trabalho. A modelagem de CPGs artificiais de Yang e França [?] é baseada na dinâmica de multigrafos SMER (*Scheduling by Multiple Edge Reversal*) [?], um algoritmo distribuído assíncrono que, observadas algumas condições discretas bastante simples, pode produzir atratores dinâmicos correspondentes aos ritmos biológicos observados na movimentação das pernas de animais, independentemente do número de pares de pernas. Uma evolução recente desta modelagem foi a integração dos ritmos apendiculares (pernas) e dorsais, que foi realizada adotando-se a *Scolopendromorpha* (lacraia) como estudo de caso [?].

A modelagem de Yang e França também inclui uma demonstração de equivalência entre um par de vértices sob SMER e um par de neurônios analógicos, conectados sob uma forma generalizada da arquitetura de Hopfield, onde conexões do tipo  $w_{ii} \neq 0$ , em cada neurônio  $i$ , fazem parte do conjunto de características que garantem o comportamento periódico das ativações. Uma generalização do acoplamento de pares é introduzida neste trabalho de forma a permitir que mais de dois neurônios sejam acoplados mutuamente, como facilmente tratado em um multigrafo sob a dinâmica SMER. Baseados nesta generalização, CPGs de animais hexápodes são construídos como estudo de caso e este trabalho introduz um novo mecanismo de controle capaz de realizar a transição entre padrões rítmicos de forma a não violar as restrições anatômicas dos movimento das pernas, diferentemente do mecanismo de transição proposto em [?], que baseia-se em animais quadrúpedes e não oferece esta garantia.

A seguir descreve-se como o restante do texto está organizado. A dinâmica SMER é descrita na próxima seção. A Seção ?? descreve como pares de neurônios analógicos podem reproduzir a dinâmica discreta SMER. Na Seção ?? descreve a generalização

de acoplamento introduzida por este trabalho e como esta constitui-se a base do novo mecanismo de transição entre ritmos periódicos. A Seção ?? apresenta uma revisão de nossas contribuições.

## 2 A dinâmica SMER

A dinâmica SMER é uma generalização do algoritmo distribuído SER (*Scheduling by Edge Reversal*) [?]. A dinâmica SER se aplica sobre grafos direcionados: somente vértices que possuam todas as arestas orientadas para si, i.e., vértices *sumidouros* (*sinks*), decidem localmente quando reverter as orientações de todas estas arestas, tornando-se vértices *fonte* (*sources*). Caso a orientação do grafo não possua ciclos orientados, i.e., acíclica, a orientação resultante da reversão das arestas dos sumidouros também será acíclica, portanto contendo necessariamente no mínimo um (1) vértice sumidouro. A indefinida sucessão de reversões por parte dos sumidouros resultará necessariamente em uma repetição de um conjunto finito com  $p$  orientações acíclicas diferentes, chamado *período*, i.e., um atrator dinâmico.

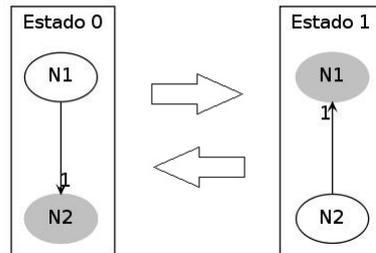


Figura 1: Exemplo de atrator dinâmico SER com comprimento de período  $p = 2$ .

A Figura ?? mostra que os vértices N1 e N2 tornam-se sumidouros, i.e., encontram “ativos”, o mesmo número de vezes após entrarem em um período. Apesar deste exemplo ser bastante simples, esse resultado se aplica a qualquer rede sob SER. SMER (*Scheduling by Multiple Edge Reversal*) [?] é uma generalização de SER em que a frequência de ativação relativa entre cada dois vértices, que é sempre igual a um (1) em SER, pode ser definida via a relação inversa das *reversibilidades*, dadas por números naturais, particulares a esses dois vértices. Na dinâmica SMER entre dois vértices N1 e N2, possuindo reversibilidades  $r_{N1}$  e  $r_{N2}$ , respectivamente, o número de arestas é dado por  $e_{ij} = r_{N1} + r_{N2} - 1$  (veja as propriedade de SMER em [?]). A reversibilidade de um vértice dita o número mínimo de arestas por vizinho necessário para sua ativação, assim como o número de arestas revertido para cada vértice vizinho após cada ativação.

A Figura ?? ilustra uma rede simples onde o vértice representando o neurônio N1 possui reversibilidade  $r_{N1} = 3$  e o vértice representando o neurônio N2 possui reversibilidade  $r_{N2} = 1$ . Esta configuração faz com que N2 se ative três vezes mais frequentemente que N1, considerando o período alcançado.

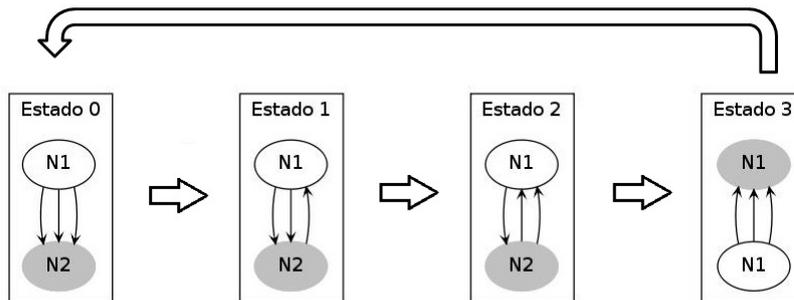


Figura 2: Exemplo de atrator dinâmico SMER com comprimento de período  $p_{N1,N2} = (r_{N1} + r_{N2})/m.d.c.(r_{N1}, r_{N2}) = 4$ .

## 3 CPG's artificiais baseados em SMER

Yang e França desenvolveram um módulo de geração de padrões rítmicos, constituído por um par de vértices sob SMER, incluindo arquitetura equivalente composta por dois neurônios artificiais, capaz de reproduzir de maneira muito direta a funcionalidade de CPGs (*Central Pattern Generators*) biológicos [?]. A partir das reversibilidades definidas para os dois vértices SMER, calcula-se os pesos entre os neurônios e respectivos *thresholds* (limiares de ativação). Como ilustrado na Figura ??, uma ligação do tipo  $w_{ii} \neq 0$  em cada neurônio  $i$  é a base do comportamento do par oscilador.

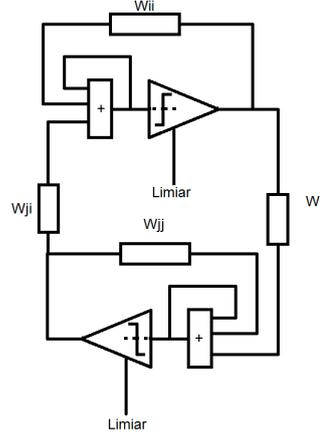


Figura 3: Bloco oscilador composto por dois neurônios artificiais  $i$  e  $j$ .

A equivalência entre dois vértices SMER, possuindo reversibilidades  $r_i$  e  $r_j$ , e dois neurônios  $i$  e  $j$  é dada pelo seguinte cálculo de pesos:

$$\begin{cases} w_{ji} = -w_{jj} = \max(r_i, r_j)/r'; \\ w_{ij} = -w_{ii} = \min(r_i, r_j)/r'; \\ \theta_i = \max(r_i, r_j)/(r_i + r_j - \text{mdc}(r_i, r_j)); \\ \theta_j = (\min(r_i, r_j) - 1)/(r_i + r_j - \text{mdc}(r_i, r_j)); \end{cases} \quad (1)$$

$r'$  representa uma normalização dos pesos, visando trabalhar com o mesmo intervalo de valores, independente das reversibilidades dos neurônios. Em [?],  $r'$  é calculado como a menor potência de 10 maior do que as reversibilidades dos vértices correspondentes aos neurônios  $i$  e  $j$ .

Em [?], encontra-se também uma abordagem para a expansão dessa modelagem para redes osciladoras mais complexas. Para tal, utiliza-se pares de neurônios como um módulo oscilador como arestas entre dois “macro-neurônios”, onde cada neurônio de cada par pertence a um macro-neurônio diferente. Além disso, um neurônio “verificador”, representante único de cada macro-neurônio, possui a função de detectar se cada neurônio pertencente ao macro-neurônio encontra-se ativo; caso positivo (AND), este torna-se ativo, forçando a redução do potencial dos neurônios dos blocos que pertencem a este. Tal se dá através de uma alteração na estrutura dos pares de neurônios, que recebem  $V(k)$  no lugar de  $v(k)$ , no instante  $k$ , onde  $V_i$  é o potencial do macro-neurônio  $i$  e  $v_i^j$  é o potencial do neurônio pertencente ao macro-neurônio  $j$  que está no bloco oscilador com o neurônio  $i$ .

$$V_i(k) = \prod_{j=1}^n v_i^j(k), \quad (2)$$

Desta forma, após um estado transiente, a rede converge para um atrator dinâmico, onde os neurônios são ativados conforme a reversibilidade associada a cada um.

#### 4 CPG's com transições entre ritmos

Este trabalho introduz algumas alterações na modelagem desenvolvida em [?]. Uma primeira mudança está no cálculo dos pesos e *thresholds* do módulo oscilatório com dois neurônios. Sendo  $r_i$  e  $r_j$  a reversibilidade dos neurônios  $i$  e  $j$ , temos que:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m_i[n] \\ m_j[n] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} m_i[n-1] \\ m_j[n-1] \end{bmatrix} + \frac{1}{r'} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} -r_i & r_j \\ r_i & -r_j \end{bmatrix}}_W \times \begin{bmatrix} v_i[n-1] \\ v_j[n-1] \end{bmatrix} \\ v_i[n] &= \begin{cases} 1, & \text{se } m_i[n] \geq \theta_i = r_i/r' \\ 0, & \text{outro caso} \end{cases} \\ v_j[n] &= \begin{cases} 1, & \text{se } m_j[n] \geq \theta_j = r_j/r' \\ 0, & \text{outro caso} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

onde  $r'$  é um fator de redução, que pode assumir o valor da maior reversibilidade dos neurônios, normalizando assim os valores entre 0 e 1. Também é importante fazer com que  $m_i + m_j = (r'_i + r_j - \text{mdc}(r_i, r_j))/r'$ . Neste trabalho escolhe-se  $m_i + m_j = r_i + r_j - 1$ , de forma a prover uma independência dos valores de reversibilidades dos neurônios, como veremos mais a frente. Além disso, assume-se  $r' = 1$ , por simplicidade. Também visando facilitar a representação, define-se a matriz  $W$  como a matriz de pesos do caso básico, sem alteração da reversibilidade.

Partindo da representação definida na Equação ??, o estudo da mudança da reversibilidade começa. Supondo um módulo citado anteriormente, considera-se o neurônio  $i$  alterando sua reversibilidade de  $r_i$  para  $r'_i$ . A diferença entre os dois casos, ocorre apenas no neurônio  $i$  (*threshold* e potencial interno) e nos pesos  $w_{ij}$  e  $w_{ii}$ . As mudanças da passagem de  $r_i$  para  $r'_i$  serão:

$$\begin{cases} m_i = m_i + (r'_i - r_i); \\ \theta_i = r'_i; \\ w_{ij} = -w_{ii} = r'_i; \end{cases} \quad (4)$$

Para que não haja substituição direta de valores, como ocorre na Equação ??, e visando facilitar a nova forma de transição, definimos  $r_i^d$  como a diferença de reversibilidades  $r_i^d = r'_i - r_i$ . Pode-se então expressar as alterações em função de  $r_i^d$ , tornando a transição de ritmo relativa ao ritmo anterior.

$$\begin{cases} m_i = m_i + r_i^d; \\ \theta_i = \theta_i + r_i^d; \\ w_{ij} = -w_{ii} = r_i + r_i^d; \end{cases} \quad (5)$$

Usando um sinal de externo  $s_i$ , pode-se controlar esta mudança de reversibilidade. Este sinal poderá assumir, por exemplo, os valores de 0 ou 1. A reversibilidade será alterada quando o valor de  $s_i$  se encontrar em 1; assim deve-se trocar a reversibilidade apenas quando o valor de  $s_i$  é alterado. Podemos então considerar um novo sistema assumindo  $s_i$ :

$$\begin{bmatrix} m_i[n] \\ m_j[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i[n-1] \\ m_j[n-1] \end{bmatrix} + s_i^* \cdot \begin{bmatrix} r_i^d \\ 0 \end{bmatrix} + \left( W + s_i \cdot \begin{bmatrix} -r_i^d & 0 \\ r_i^d & 0 \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} v_i[n-1] \\ v_j[n-1] \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde  $s_i^* = s_i[n] - s_i[n-1]$ , representa a transição do controle de reversibilidade. Expandindo-se para o caso de mudança da reversibilidade de ambos os neurônios, temos:

$$\begin{bmatrix} m_i[n] \\ m_j[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i[n-1] \\ m_j[n-1] \end{bmatrix} + s_i^* \cdot \begin{bmatrix} r_i^d \\ 0 \end{bmatrix} + s_j^* \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ r_j^d \end{bmatrix} + \left( W + s_i \cdot \begin{bmatrix} -r_i^d & 0 \\ r_i^d & 0 \end{bmatrix} + s_j \cdot \begin{bmatrix} 0 & r_j^d \\ 0 & -r_j^d \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} v_i[n-1] \\ v_j[n-1] \end{bmatrix} \quad (7)$$

#### 4.1 Exemplo de oscilação com reversibilidade controlada

A Figura ?? ilustra um exemplo onde uma oscilação em que ambas as reversibilidades valem 1. Na Figura ??, temos a transição da reversibilidade do neurônio N1 para 3, quando se passa um terço do tempo, e quando se passam dois terços do tempo a reversibilidade de N2 é alterada para 5.

### 5 Generalização do Método de Transições de Ritmos em Redes

Em [?], a generalização foi feita a partir de um “verificador” do tipo “and” de todos os neurônios. Para continuar com a representação vetorial, implementamos este verificador com um neurônio, o “macro-neurônio” (recebe este nome, pois seu potencial equivale a saída do neurônio). Supondo que haja  $N$  arestas ligadas a este neurônio, teremos  $N$  neurônios de módulos osciladores ligados a este macro-neurônio com peso igual a  $\frac{1}{N}$  e *threshold* equivalente a 1. A Figura ?? ilustra esta estrutura.

$$M_i[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^j[n] \quad (8)$$

$$V_i[n] = \begin{cases} 1, & \text{se } M_i[n] = 1 \\ 0, & \text{outro caso} \end{cases}$$

Uma outra alteração na rede, já citada anteriormente, se dá pela troca de  $v_i$  e  $v_j$  na equação ?? pelos potenciais dos macro-neurônios  $V_i$  e  $V_j$ . Note que  $s_i$  e  $s_j$  alteram a reversibilidade dos macro-neurônios  $i$  e  $j$ , respectivamente. Assim, cada neurônio de cada bloco oscilador deve receber este valor.

$$\begin{bmatrix} m_i^j[n] \\ m_j^i[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i^j[n-1] \\ m_j^i[n-1] \end{bmatrix} + s_i^* \cdot \begin{bmatrix} r_i^d \\ 0 \end{bmatrix} + s_j^* \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ r_j^d \end{bmatrix} + \left( W + s_i \cdot \begin{bmatrix} -r_i^d & 0 \\ r_i^d & 0 \end{bmatrix} + s_j \cdot \begin{bmatrix} 0 & r_j^d \\ 0 & -r_j^d \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} V_i[n-1] \\ V_j[n-1] \end{bmatrix} \quad (9)$$

#### 5.1 Um exemplo do caso generalizado

Em [?] é oferecido o exemplo da modelagem dos ritmos do caminhar de um inseto; usaremos o mesmo exemplo visando introduzir alterações dinâmicas no ritmo do caminhar. O modelo representa os conjuntos de músculos **flexores** e **extensores** como os vértices do CPG artificial baseado em SMER. Por exemplo, quando o nó representando o conjunto de músculos flexores extensores está ativo, significa estar que a pata está flexionada. A arquitetura SMER observa a restrição aos movimentos entre os músculos flexores ou extensores entre pernas vizinhas de um mesmo lado do animal, sendo que duas destas nunca devem se encontrar em flexão, i.e., fora do solo, ao mesmo tempo.

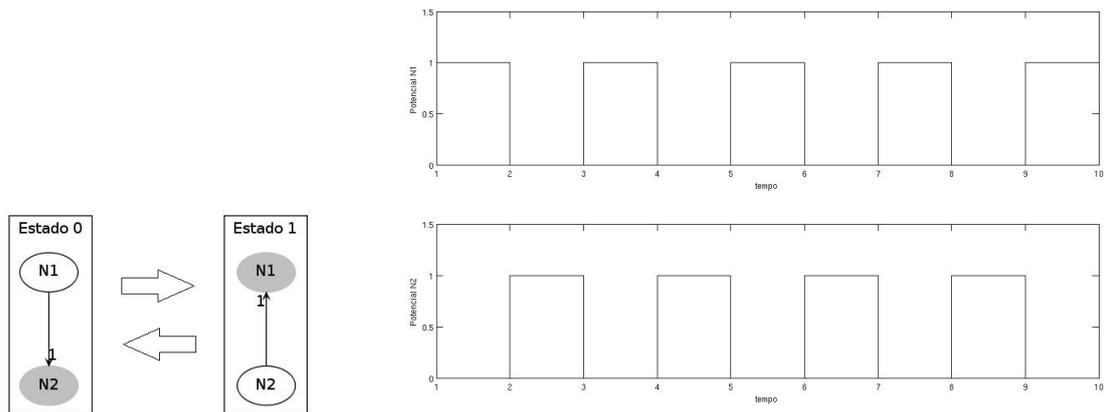


Figura 4: Potencial em uma oscilação tipo SER entre N1 e N2,  $r_{N1} = 1, r_{N2} = 1$ .

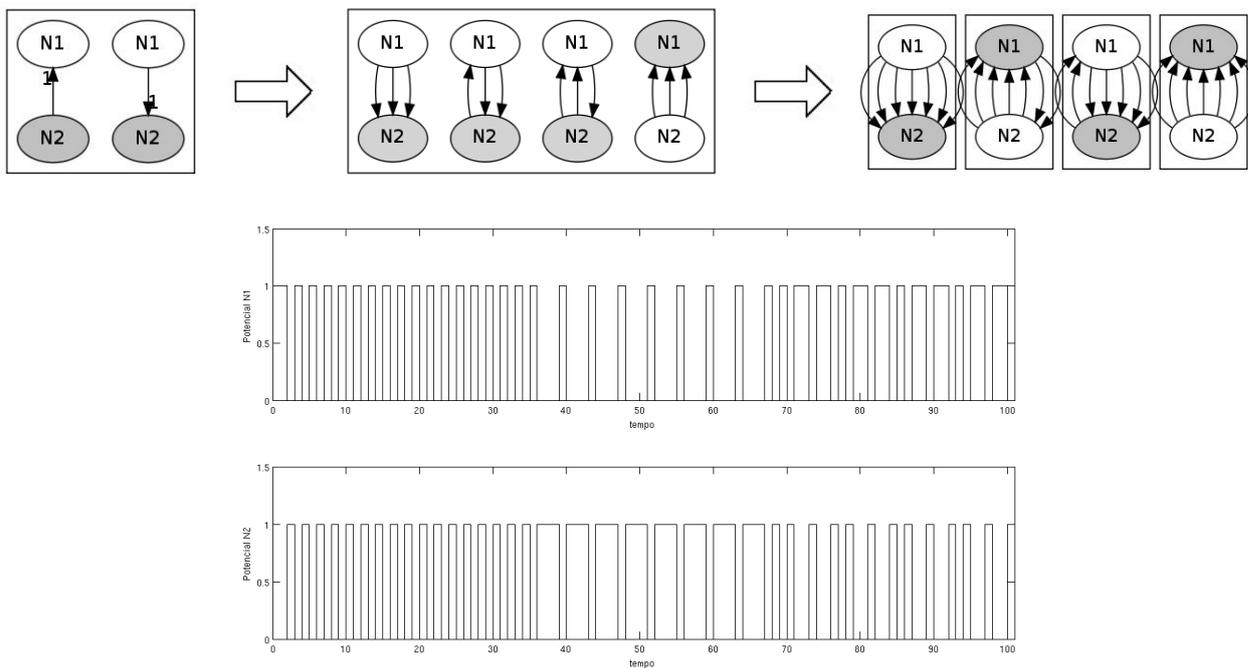


Figura 5: Potencial em uma oscilação tipo SMER com duas transições:  $r_{N1} = 1, r_{N2} = 1, r_{N1} = 3, r_{N2} = 1$  e  $r_{N1} = 3, r_{N2} = 5$ .

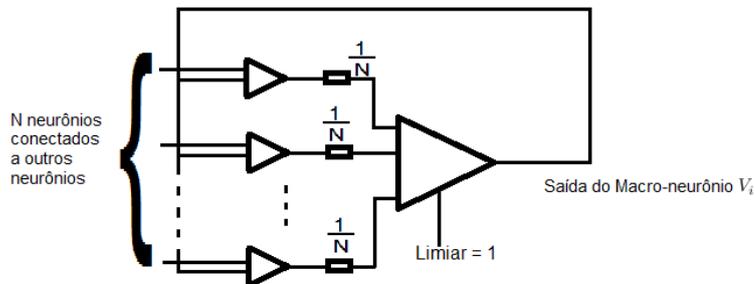


Figura 6: Estrutura de um “macro-neurônio”.

Os diferentes ritmos de caminhada se definem em função da frequência com que um vértice flexor está ativo em relação ao respectivo vértice extensor. O ritmo correspondente à velocidade máxima ocorre quando esta relação é 1:1, e a velocidade é mais lenta quanto menor for esta relação. Na Figura ?? mostramos exemplo dos ritmos 1:1, o mais rápido, e a relação 1:3, ritmo mais lento. Visando facilitar a visualização, apenas os vértices flexores serão representados juntamente com o número de arestas direcionadas a estes usando o código de cores mostrado na Figura ??.

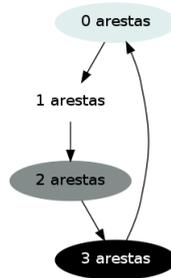


Figura 7: Código de cores associado às transições de reversibilidades.

No caso mais rápido (razão das reversibilidades 1:1) tem-se apenas 2 estados; já alterando a reversibilidade de todos os flexores, conseguimos um ritmo mais lento.

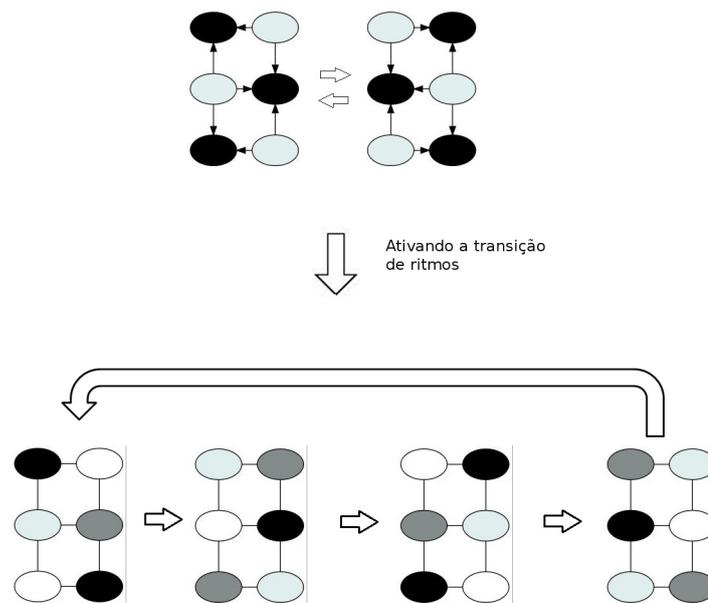


Figura 8: Exemplo de transição de ritmos de CPG de hexápode: pares extensor-flexor com reversibilidades 1:1 passam para reversibilidades 1:3.

Na Figura ??, pode-se ver a saída de uma simulação onde os potenciais de saída de um par de neurônios extensor e flexor, ambos associados ao movimento de uma mesma perna, são representadas. Neste caso, a mudança de ritmo ocorre quando decorrido um terço da simulação.

Neste caso, cada bloco oscilador formado por um par flexor-extensor será equacionado da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} m_f[n] \\ m_e[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_f[n-1] \\ m_e[n-1] \end{bmatrix} + s_f^* \cdot \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} + \left( W + s_f \cdot \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 2 & 0 \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} V_f[n-1] \\ V_e[n-1] \end{bmatrix} \quad (10)$$

O modulo oscilador entre dois flexores será definido por

$$\begin{bmatrix} m_f^1[n] \\ m_f^2[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_f^1[n-1] \\ m_f^2[n-1] \end{bmatrix} + s_f^* \cdot \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix} + \left( W + s_f \cdot \begin{bmatrix} -2 & 2 \\ 2 & -2 \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} V_f^1[n-1] \\ V_f^2[n-1] \end{bmatrix} \quad (11)$$

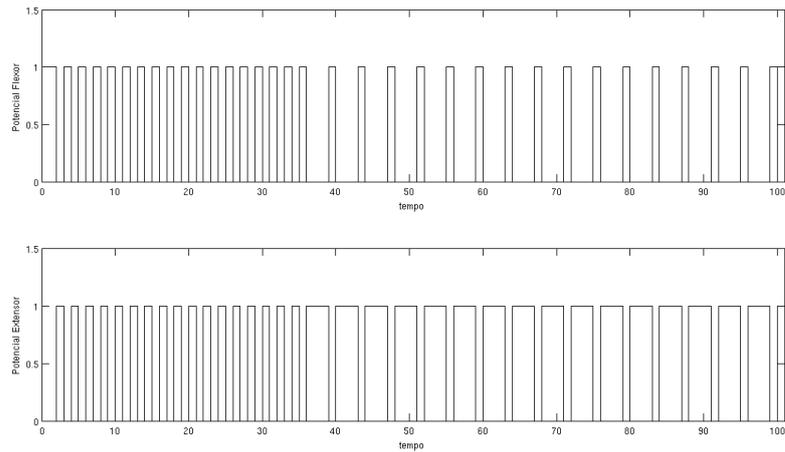


Figura 9: Potencial das saídas de pares de neurônios extensor-flexor do exemplo ilustrado pela Figura ??

Dessa forma, quando  $s_f$  sair do valor 0 para o valor 1 tem-se a transição entre o primeiro ritmo e o segundo ritmo ilustrados na Figura ??, e vice-versa assim que  $s_f$  volte para 0.

## 6. CONCLUSÃO

Foi apresentada uma nova modelagem para o controle da transição de ritmos em CPGs (*Central Pattern Generators*) artificiais baseados em dinâmicas SMER. Uma generalização de acoplamento entre múltiplos neurônios artificiais com saída contínua foi introduzida e a corretude desta generalização foi demonstrada através de análise matemática e de simulações. Exemplos de transições entre padrões rítmicos diferentes foram apresentados e tais simulações mostram a pertinência das dinâmicas SMER como mecanismo fundamental aos ritmos biológicos observados em CPGs. Embora não tenha sido explicitado, a possibilidade de ativação assíncrona nas dinâmicas SMER levanta a possibilidade de se produzir soluções robóticas com a habilidade de adaptação em tempo real dos ritmos de caminhadas em solos irregulares, como é de fato observado na natureza.

## Referências

- [1] Z. Yang, F. M. G. França, A General Rhythmic Pattern Generation Architecture for Legged Locomotion. In: Ana B. Porto Pazos, Alejandro Pazos Sierra, Washington Bruño Buceta, **Advancing Artificial Intelligence Through Biological Process Applications**, Hershey, USA: Medical Information Science Reference, (2008), 202–229.
- [2] Braga, R. R., Yang, Z., França, F. M. G., IMPLEMENTING AN ARTIFICIAL CENTIPEDE CPG: Integrating appendicular and axial movements of the scolopendromorph centipede. In: **International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing**, 2008, Funchal. Proceedings of BIOSIGNALS. Setúbal : INSTICC Press, 2 (2008), 58–62.
- [3] Omar Lengerke, Diego Carvalho, Priscila M. V. Lima, Max S. Dutra, Felipe M. G. França, Controle Distribuído de Sistemas *Job Shop* usando Escalonamento por Reversão de aresta, **XIV Latin Ibero-American Congress on Operations Research**, (2008).
- [4] Valmir C. Barbosa , Mario R.T. Benevides and Felipe M. G. França, Sharing Resources at Nonuniform Access Rates, **Theory of Computing Systems**, 34 (2001), 13–26 .
- [5] Valmir C. Barbosa, Eli Gafni, Concurrency in Heavy Loaded Neighborhood-Constrained Systems, **ACM Transactions on Programming Languages and Systems**, 11 (1989), 562–584.
- [6] Zhijun Yang, Felipe M.G. França, A generalized locomotion CPG architecture based on oscillatory building blocks, **Biological Cybernetics**, 89 (2003), 34–42.
- [7] Zhijun Yang, Juan Huo and Alan Murray, SELF-ORGANISATION OF GAIT PATTERN TRANSITION: An Efficient Approach to Implementing Animal Gaits and Gait Transitions, In: **International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics**, Proc. of ICINCO 2008 (2008) 75–79.