

# Neurônios morfológicos: Uma introdução às células on-off artificiais

Francisco A.Tavares F. da Silva. Grupo de Processamento Inteligente de Sinais, \*INPE-MCT e Faculdade 7 de Setembro-FA7-CE

\*Estrada do fio, 6000, Tupuiu, CEP: 61760-000, Eusébio-CE  
e-mail: [tavares@roen.inpe.br](mailto:tavares@roen.inpe.br)

**Abstract**— This work proposes the modeling of on-off cells by the use of morphological neurons. The mathematical model has inspiration on the biological shape perception theory coming from Kuffler, Hubel and Wiesel's paradigms applied to modeling of biological neurons. This new approach makes use of adaptive morphological operators which can be implemented by unsupervised and competitive learning techniques. This connectionist paradigm is inspired on the neurons from retina toward lateral geniculate nucleus. The work must contribute on the development of new connectionist formalisms and also on the implementation of new smart sensors devices.

**Index Terms**—active vision, artificial retina, connectionist models, morphological neurons, on-off cells, shape perception, smart sensors, space applications.

## I. INTRODUÇÃO

A LITERATURA da área de neurociência, concernente ao sistema visual dos mamíferos, considera os primeiros estágios da percepção visual os “arranjos” ou camadas de circuitos mais externos e mais internos (do inglês *outer layer* e *inner layer*), compostos na grande maioria pelas células *fotorreceptores*, *bipolares*, *horizontais*, *amácrinas* e *ganglionares* [6,8,15].

Estas células e circuitos têm sido exaustivamente estudados por vários pesquisadores, os quais, inspirados em Kuffler, Hubel e Wiesel [1,4,5,9], têm modelado o sistema visual, conforme pode ser observado em Kandel et al. [6], Calson [15], Lent [8] e Samuel et al. [13], dentre vários outros trabalhos de igual importância.

Por outro lado, segundo Kuffler et. al. [1], o termo *campo receptivo*, dos neurônios biológicos, foi usado por Sherrington [2] e re-introduzido por Hartline [3]. Enquanto que Levine e Shefner [7] definiram campos receptivos como “*áreas em que a estimulação conduz à resposta de um neurônio sensorial particular*”.

Entretanto, a literatura da área de neurociência não aborda qualquer formalismo ou modelagem de *células* e seus respectivos *campos receptivos centro-on e/ou centro-off*, em direção as *células mais complexas*, sob a perspectiva da *parametrização adaptativa* de operadores elementares da Morfologia Matemática-MM.

Portanto, o presente trabalho explora as propriedades e a parametrização dos operadores da MM, em direção aos novos paradigmas de neurônios morfológicos artificiais, inspirados nas células centro-on e/ou centro-off conforme investigadas por Kuffler, Hubel e Wiesel [1,4,5,9].

Do ponto de vista matemático esta abordagem pode ser vista como um caso particular do formalismo apresentado em Silva [10]. No entanto, diferente dos modelos anteriores [10,18,27,28,29], esta abordagem, inspirada na investigação de Kuffler, Hubel e Wiesel [1,4,5,9], apresenta a modelagem de *células centro-on* e *centro-off artificiais*, as quais são implementadas diretamente por subconjuntos “*janelas*” específicas e *operadores elementares* da MM, conforme detalhado nas seções 3, 4 e 5.

O modelo proposto é inspirado na teoria clássica de percepção desenvolvida por Kuffler, Hubel e Wiesel [1,4,5,9], considerando-se as propriedades dos operadores da Morfologia Matemática. Para isto, são investigados alguns aspectos dos modelos das células do sistema visual e seus respectivos campos receptivos, núcleos on/off, em direção a simulação computacional de *arranjos* ou “redes” de “*células on/off artificiais*”.

Espera-se que esta investigação possa contribuir no desenvolvimento de uma plataforma computacional, dedicada a construção de sistemas eficientes de Visão Ativa. Principalmente quando aplicados à área de próteses ou retinas artificiais [31], e, também, na implementação de novos *sensores inteligentes* [12], os quais devem contribuir no desenvolvimento das aplicações aeronáuticas e espaciais [11,12].

## II. CÉLULAS ON/OFF E A DETECÇÃO DE FORMAS

No presente trabalho, é importante observar que a detecção e o reconhecimento de padrões é parte do processo de percepção [5,6,7,15], considerando-se a diferença entre a detecção dos “pontos de excitação” [16,17], sob baixo nível de abstração, e o reconhecimento de estruturas mais complexas, denominadas de *formas*, conforme proposto por Hubel e Wiesel [4,5].

No trabalho de Hubel e Wiesel é possível observar os arranjos dos grupos de *células on-off*, responsáveis pela detecção de contraste dos “pontos de excitação”, e, também, a importância destas composições junto às *células estreladas* e as células mais *complexas* [5,6,7,15].

De acordo com Hubel e Wiesel [4,5], diferente do princípio de excitação das células receptoras “cones e bastonetes”, as células mais *complexas*, envolvidas na percepção visual, são mantidas no *estado de inibição* “quando submetidas a pequenos pontos isolados de luz, mas respondem a formas específicas” [5,6,7,15]. Segundo Hubel e Wiesel [4,5], esta propriedade, somada ao comportamento dos eixos de orientação nas células corticais, sugere uma forte evidência sobre a existência de um “mecanismo biológico” no que concerne a “invariância a posição” [4,5,6,7,15].

Por outro lado, a despeito das ações de movimento do globo ocular, os operadores elementares da Morfologia Matemática, apresentam uma propriedade semelhante à “invariância a posição”. Na Morfologia Matemática esta propriedade também é conhecida como *invariância à translação* [19,20,21].

Do ponto de vista da modelagem de células on/off artificiais, a representação de formas complexas, via células elementares (janelas simples), pode ser usada na detecção de formas específicas, conforme o modelo e o exemplo apresentados respectivamente nas seções 4, 5 e 6.

Um arranjo de células on-off artificiais, inspirado na investigação de Hubel e Wiesel [4,5], e um mecanismo para excitação e/ou inibição de “grupos de pixels” específicos, visando à detecção de formas dotada de “invariância a translação”, contemplam os aspectos principais considerados no formalismo proposto.

### III. INTRODUÇÃO A MORFOLOGIA MATEMÁTICA

A Morfologia Matemática-MM é a área de processamento de imagens [19] que, baseada na teoria dos reticulados, permite implementar algoritmos utilizados nas tarefas de transformações de padrões em termos dos *operadores elementares* denominados *dilatações* e *erosões* [20,21], e, também, *antidilatações* e *antierosões*, conforme apresentado em [22,23].

O formalismo de operadores elementares em níveis de cinza, utilizando ELUTs (Elementary Look Up Tables), pode ser observado em [24,25,26]. A seguir é introduzido o formalismo usado para representar o casamento de padrões de imagens em níveis de cinza [26].

Sejam,  $\mathbf{Z}$  o conjunto dos números inteiros,  $\mathbf{Z}^2$  o produto cartesiano  $\mathbf{Z} \times \mathbf{Z}$  (conjunto dos pares ordenados de inteiros),  $D \subset \mathbf{Z}^2$  (domínio das imagens),  $W \subset \mathbf{Z}^2$  (domínio das imagens ou dos padrões) chamado *janela*, e  $K_m$  o intervalo  $[0, m] \subset \mathbf{Z}$  (escala de cinza das imagens).

Denota-se  $K_m^D$  o conjunto dos mapeamentos de  $D$  em  $K_m$ . Estes mapeamentos são representações matemáticas apropriadas para as imagens em níveis de cinza, sobre o domínio  $D$  (conjuntos das posições dos pixels) e escala de cinza  $K_m$ , ver Banon [25].

Portanto, as imagens digitais que estão sendo consideradas, podem ser representadas como elementos de  $K_m^D$ . Se  $f \in K_m^D$ , e  $m$  é igual a 1, então  $f$  é uma imagem binária, caso contrário,  $f$  é uma imagem em níveis de cinza.

Sejam  $f_W \in K_m^W$  (padrão), e  $c_1, c_2 \in \mathbf{Z}$  duas constantes tais que  $c_1 \leq c_2$ .

Defini-se por  $f_W^-$  e  $f_W^+$  duas imagens em  $K_m^W$ ,

$$f_W^-(x) \triangleq \max \{0, \min (m, f_W(x) + c_1)\} \quad (3.1a)$$

$$f_W^+(x) \triangleq \max \{0, \min (m, f_W(x) + c_2)\} \quad (3.1b)$$

onde  $x \in W$ .

Sejam  $E = D \ominus W$  (onde o símbolo  $\ominus$  representa a subtração de Minkowski [26],  $l$  um número inteiro em  $K_n$  e  $i = 1, \dots, n$ , onde  $n = \#W$  (o número de elementos de  $W$ ). Seja  $i \mapsto w_i$  uma bijeção entre  $\{1, \dots, n\}$  e  $W$  ( $i$  define a enumeração das posições de  $W$ ).

Denota-se por  $\mathcal{E}_l^i$  e  $\mathcal{D}_l^{ai}$ , respectivamente *erosão* e *anti-dilatação*, os operadores de  $K_m^D$  em  $K_1^E$ , definidos por:

$$\mathcal{E}_l^i(g)(x) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } g(x + w_i) \geq l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.2a)$$

$$\mathcal{D}_l^{ai}(g)(x) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } g(x + w_i) \leq l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.2b)$$

para todo  $g \in K_m^D$  e  $x \in E$ .

Os operadores  $\mathcal{E}_l^i$  são erosões e os  $\mathcal{D}_l^{ai}$  são anti-dilatações de  $K_m^D$  em  $K_1^E$ .

Denota-se por  $\lambda^i$  o operador de  $K_m^D$  em  $K_1^E$ , definido por:

$$\lambda^i \triangleq \mathcal{E}_{f_W^-(w_i)}^i \wedge \mathcal{D}_{f_W^+(w_i)}^{ai} \quad (3.3)$$

Os operadores  $\lambda^i$  são operadores *superadores* da morfologia [23].

O operador de  $K_m^D$  em  $K_n^E$  denotado por  $\phi$  e denominado *operador de casamento de padrões* [26], é o operador dado por:

$$\phi \triangleq \sum_{i=1, \dots, n} \lambda^i \quad (3.4)$$

O valor  $\phi(g)(x)$  mede a *similaridade* entre o padrão  $f_W$  e a sub imagem de  $g$ , vista através de  $W$  transladado de  $x$ . No caso da sub imagem ser exatamente  $f_W$ , a similaridade será igual a  $n$ . Se  $c_1 \neq c_2$  então o modelo acima permite fazer um *casamento com folga* nos níveis de cinza.

A seguir, é apresentado o operador sobre imagens digitais, o qual permite localizar padrões com valores de similaridade acima ou igual a um determinado limiar em uma imagem  $f$  [27].

Seja  $l \in K_n$ . O operador de limiarização  $\psi_l^*$  de  $K_n^E$  em  $K_1$  que localiza os valores de similaridade acima ou igual a  $l$  é o operador dado por:

$$\psi_l^*(f) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } \exists x \in E, f(x) \geq l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.5)$$

Este operador “dilatação” é muito útil para implementação de operadores de *detecção com folga*, o qual será tratado a seguir.

Para efeitos práticos deve-se compor o operador de limiarização (Expressão 3.5) com o operador de casamento de padrões (Expressão 3.4), esta composição permite a *detecção com folga* (limiarizada) de padrões [27].

$$\psi_i \circ \phi \quad (3.6)$$

onde o símbolo  $\circ$  denota a composição de mapeamentos.

#### IV. MODELAGEM DE CÉLULAS ON-OFF ARTIFICIAIS VIA OPERADORES MORFOLÓGICOS

O modelo de células on-off apresentado por Hubel e Wiesel [4,5] identifica células constituídas, respectivamente, por núcleos sensíveis aos níveis de alta intensidade radiométrica (centro-on) e outras constituídas por núcleos sensíveis a baixa intensidade radiométrica (centro-off).

A modelagem de células artificiais, ou *neurônios morfológicos* [10], via operadores da MM tipo erosão e antidilatação, apresenta a possibilidade de detecção de contrastes de grupos de pixels  $f$ , em uma imagem  $g$ , conforme pode ser verificado pela Expressão 3.6.

Entretanto, quando tais operadores (Expressões 3.2a e 3.2b), são dotados de *janelas*  $W$ , cujos centros, respectivamente, são dotados de maior nível radiométrico (centro-on) e menor nível radiométrico (centro-off), Figuras 4a e 4b, é possível excitar tais células artificiais quando se apresentam grupos de pixels, cujos níveis radiométricos coincidam com as janelas centro-on ou centro-off respectivamente.

Portanto, o presente modelo, de células on-off artificiais, apresenta um formalismo que permite simular o comportamento de detecção de contrastes em janelas centro-on e centro-off, numa alusão ao modelo biológico de células on-off [4,5].

Por exemplo, considere o campo receptivo para excitação (brilho) no *feixe de dendritos* do tipo circular [4], arranjados no centro da célula-on (célula centro-on), portanto, pode-se utilizar uma janela do tipo  $W_{on}$  como apresentadas na Figura 4a.

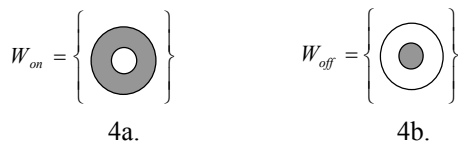


Figura 4. Exemplo de *janelas*  $W_{on}$  e  $W_{off}$ , aplicadas, respectivamente, a representação das *células centro-on* e *centro-off* artificiais.

Entretanto, no caso do desejado ser um nível de excitação na periferia, ou inibição no centro (ex: célula centro-off), em forma circular, pode-se utilizar um operador do tipo *antidilatação* com a janela  $W_{off}$ , cujo centro deverá conter um nível radiométrico mais baixo que a periferia, conforme apresentado na Figura 4b.

Isto permite, por exemplo, que o tipo de contraste projetado por um *feixe de luz* “barra clara”, numa “tela escura”

(Figuras 6.1 e 6.2), produza excitação num determinado arranjo de células *centro-on* e inibição nas células *centro-off*, conforme pode ser observado na Figura 5.1.

Para resumir, o que concerne à representação morfológica, considere a Expressão 3.2a, dotada de uma janela  $W_{on}$ , conforme apresentada na Figura 4a, a representação matemática para a célula artificial centro-on em análise. Por outro lado, a Expressão 3.2b, dotada da janela  $W_{off}$ , Figura 4b, pode-se apresentar o formalismo para a célula artificial centro-off.

A definição de operadores do tipo *erosão*, Expressão 3.2a, dotado de uma janela  $W_{on}$ , cujo centro contém um nível radiométrico mais alto que a periferia, é usada na simulação do efeito de ativação tipo *centro-on* (célula centro-on). Por outro lado, a definição de operador do tipo *antidilatação*, dotado de uma janela  $W_{off}$ , é usada na simulação do efeito de uma célula tipo *centro-off*, conforme pode ser observado nas seções 5 e 6.

É importante observar que o operador *erosão*, Expressão 3.2a, apresenta como *saída* o nível ativo 1 se houver no *campo visual*, aqui representado pela imagem  $g$ , uma excitação suficiente, considerando-se o nível ou limiar  $l$ .

Isto é, os *núcleos* “centro-on” (excitação no centro) devem apresentar um número de *casamentos* (do inglês *template matching*) dentro do limiar  $l$ . Um raciocínio semelhante pode ser aplicado à Expressão 3.2b, no entanto, neste caso, os *núcleos* “centro-off” correspondem à *inibição* e a “periferia-on” *excitação*.

No entanto, embora exista alguma inspiração decorrente de células on-off biológicas, foge ao escopo do presente trabalho a emulação das diversas propriedades biológicas.

#### V. APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Nesta primeira abordagem é apresentada a implementação de um arranjo de células on/off artificiais, aplicado à detecção de formas, inspirado em alguns aspectos biológicos da teoria da percepção proposta por Hubel e Wiesel [4,5].

Diferente de modelos de redes morfológicas anteriores [10,28,29], o modelo dos neurônios morfológicos proposto neste trabalho é inspirado nas células *centro-on* e *centro-off* simples [4,5]. Isto é, o modelo proposto tem inspiração nos arranjos de células mais simples observadas nas investigações de Hubel e Wiesel, conforme apresentado em [4,5] e analisado em Kandel et al. [6], Lent [8] e Calson [15].

Uma possível aplicação do modelo, usando as janelas definidas na seção 4, pode ser implementada via, por exemplo, o arranjo apresentado na Figura 5.1. Este arranjo é definido por uma *camada de entrada*, constituída por operadores morfológicos, Expressões 3.2a e 3.2b, representantes das células *centro-on* e *centro-off* artificiais. Enquanto que a segunda camada é constituída por operadores *superadores* definidos pela Expressão 3.3.

Uma terceira camada, responsável pela *sinalização* da detecção de um padrão, é constituída por operadores de *casamento de padrões* em composição com operador de *limiarização*, Expressão 3.6, e uma quarta camada constituída por operadores dilatação, Expressão 5.1.

A quarta camada, contendo as *células de reconstrução*, é facultativa, uma vez que a camada anterior poderia ser utilizada como camada de saída. No entanto, no presente modelo, esta quarta camada reflete uma alusão aos experimentos realizados por Hubel e Wiesel [4,5].

Os detalhes e a inspiração biológica sobre tais composições podem ser observados em Kandel et al. [6]. Os autores apresentam os detalhes do modelo clássico do sistema visual e uma análise das funções das células de *orientação*, da camada de orientação, junto as células *estreladas*, geralmente encontradas na região  $4C\beta$  [6,8,15].

A primeira camada implementa as células receptoras ou *retina artificial*, a segunda camada efetua o primeiro nível de detecção de contraste. A terceira camada é utilizada para sinalização do tipo de excitação e a quarta camada é utilizada para reconstituição dos níveis de excitação da entrada “padrão  $f_w$ ” ou para associação do contraste a um maior nível de abstração.

Sejam as funções  $f \in K_m^W$ ,  $g \in K_m^D$ ,  $f_w^+$  e  $f_w^- \in K_m^W$ , respectivamente, o padrão apresentado a ser detectado, a imagem contendo possíveis padrões a serem detectados, e o tipo dos “pesos” dos *neurônios morfológicos*. Então é possível definir uma RNA, formada por quatro camadas, contendo neurônios morfológicos, conforme apresentado na Figura 5.1 a seguir.

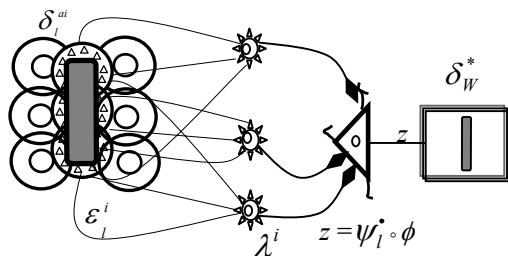


Figura 5.1. Exemplo de arranjo aplicado à detecção de formas, via células on-off artificiais. Adaptado de Hubel e Wiesel [4,5].

Aqui um detalhamento do modelo proposto, Figura 5.2, usado no exemplo de aplicação, conforme apresentado nas Figuras 5.1, 6.1 e 6.2, se faz necessário para esclarecer a modelagem das primeiras duas camadas.

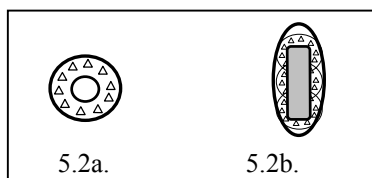


Figura 5.2. A Figura 5.2a apresenta uma célula tipo *centro-on* simples. A Figura 5.2b apresenta um agrupamento correspondente à excitação de três células tipo *on* e/ou *off* simples.

Na Figura 5.2a, pode-se observar um exemplo de célula *centro-on*, contendo um “diâmetro” de dez pixels no centro e 30 pixels na periferia respectivamente. Na Figura 5.2b, pode-se observar uma célula *centro-off*, correspondente à excitação de três células *centro-off* “menores”, numa formação em *linha* ou *barra*.

O operador  $\delta_w^*$ , conforme Expressão 5.1, é um caso particular do operador *dilatação* da MM, dotado da janela  $W$ , onde  $f_w$  representa, neste caso, o conjunto dos níveis ativos das células aferentes ativadas. O resultado é a dilatação da janela  $W$  pelo valor de saída  $z$ , cujo efeito prático é similar ao neurônio *outstar* proposto por Carpenter e Grossberg [30].

$$\delta_w^*(z) \triangleq \begin{cases} f_w & , \text{ se } z = 1 \\ 0_w & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (5.1)$$

O limiar  $l$ , encontrado na composição 3.6, junto às definições 3.1a e 3.1b, compõem uma importante contribuição quanto à plasticidade, pois este tipo de célula pode ser adaptado para vários níveis de excitação, dependendo do contraste radiométrico, apresentado no campo visual, “*imagem g*” apresentada à camada de entrada.

Como pode ser observado, nas seções 3 e 4, o modelo de células on-off artificiais, via janelas  $W_{on}$  e  $W_{off}$ , é inspirado no modelo de células on/off investigado por Kuffler, Hubel e Wiesel [1,4,5,9] e pode ser configurado para detecção de contraste em direção aos níveis mais altos de abstração conforme o arranjo apresentado na Figura 5.1.

No entanto, embora esta seja uma nova abordagem, quando considerado a implementação das células on-off artificiais, os algoritmos de treinamento e ativação já apresentados em Silva [10] podem ser facilmente adaptados para uma primeira simulação.

Neste caso, o treinamento consiste em apresentar o padrão “ $f$ ”, a ser treinado, ao conjunto de células on/off. Em seguida, o algoritmo deve verificar quais células estão excitadas e quais estão inibidas. Esses sinais são “treinados” (armazenados) nos “pesos” correspondes,  $f_w^+$  e  $f_w^-$ , das células  $\lambda^i$  subsequentes (Expressão 3.3). A seguir é apresentado um resumo do algoritmo de treinamento usado:

- Passo\_1: Iniciar os pesos  $f_w^+$  e  $f_w^-$  aleatoriamente;
- Passo\_2: Apresentar a entrada  $f$ , onde  $f$  é o padrão de entrada propagado para todas as células ons e offs;
- Passo\_3: Verificar quais células on-off (definição de agrupamento on-off tipo  $\lambda$ ) são excitadas (Expressões 3.2a e 3.2b);
- Passo 4: Verificar quais células  $\psi^* \circ \phi$  são excitadas (Expressão 3.6) pelo agrupamento on-off;
- Passo\_5: Caso exista representante da classe do padrão corrente, pular para o Passo 9;
- Passo\_6: Verificar neurônios  $\psi^* \circ \phi$  disponíveis para treinamento (do agrupamento on-off corrente);
- Passo\_7: Caso mais de um neurônio esteja livre para treinamento, aplicar competição, via distância Euclidiana, para determinar qual célula  $\psi_i^* \circ \phi$  demanda menor esforço para representar o agrupamento das células on-off representantes do padrão  $f$  corrente;
- Passo\_8: Atualizar pesos  $f_w^+$  e  $f_w^-$  da célula  $\psi_i^* \circ \phi$ ;

Passo\_9: Retornar ao passo 2, caso existam padrões a serem apresentados;

Passo\_10: Fim (Terminar treinamento).

Em tempo de ativação, a imagem  $g$  é apresentada as células *on-off*, as quais transmitem os sinais de agrupamentos as células  $\lambda^i$ , Expressão 3.5, que por suas vez detectam a excitação do respectivo agrupamento de células tipo  $\psi_i \circ \phi$ .

Em seguida, verifica-se quais células  $\psi_i \circ \phi$  são excitadas. Esta excitação ocorre apenas quando tais células são expostas aos sinais “semelhantes” aos treinados, dentro de uma *folga* determinada por um limiar  $l$ , conforme Expressão 3.6.

Isto é, em tempo de ativação, a imagem  $g$  é apresentada à camada de entrada e é processada através dos operadores de cada camada, conforme Figura 5.1, utilizando o algoritmo de ativação a seguir:

Passo\_1: Inicializar pesos e limiares;

Passo\_2: Apresentar imagem  $g$  (contendo o padrão a ser reconhecido) à camada de entrada;

Passo\_3: Verificar ativação das células *on-off* (possível agrupamento *on-off* tipo  $\lambda$ );

Passo\_4: Verificar ativação do neurônio  $\psi_i \circ \phi$  correspondente ao agrupamento  $\lambda^i$  (agrupamento *on-off*);

Passo\_5: Se algum neurônio  $\psi_i \circ \phi$  apresenta excitação ( $z=1$ ), ativar saída  $\delta_w^*$  do respectivo neurônio  $\psi_i \circ \phi$ ;

Passo\_6: Se existir algum outro padrão (a ser reconhecido), voltar ao passo 2;

Passo\_7: Fim (Terminar a ativação).

## VI. PRIMEIROS EXPERIMENTOS E ALGUNS RESULTADOS

Estes primeiros experimentos apresentam ativações similares ao comportamento biológico investigado por Hubel e Wiesel [4,5], concernente a investigação do comportamento das células *on-off*, e a propagação dos sinais nas células do sistema visual, quando expostas a uma *barra* “clara” (feixe de luz) sobre uma “tela escura”.

Neste experimento a barra é representada pelo “padrão  $f$ ” projetado numa tela escura “imagem  $g$ ”, conforme pode ser observado nas Figuras 6.1a e 6.2a.



6.1a

6.1b

Figura 6.1. Exemplo de detecção de uma barra vertical.



6.2a

6.2b

Figura 6.2. Detecção invariante a translação.

Aqui é importante notar que o experimento realizado apresenta o reconhecimento de um padrão simples, tipo “barra”, apenas para ilustrar o funcionamento do modelo. No entanto, este arranjo mostra os detalhes da “configuração” das células *on/off* artificiais, nas tarefas de representação e detecção de um padrão específico.

A Figura 6.1 apresenta uma ativação contendo a barra no centro da tela, enquanto que a Figura 6.2 mostra a detecção invariante à translação. As Figuras 6.1a e 6.2a, ou imagens  $g$ , apresentam as entradas a serem detectadas, via um treinamento prévio. Enquanto que as Figuras 6.1b e 6.2b apresentam o padrão  $f$  detectado em tempo de ativação do arranjo sob análise.

## VII. COMENTÁRIOS E PERSPECTIVAS

Diferente do modelo apresentado em Silva [10], Davidson e Hummer [28] e Wilson [29], a modelagem apresentada pode implementar camadas de *células on-off artificiais*, Expressões 3.2a e 3.2b, constituídas por *janelas*  $W_{on}$  e  $W_{off}$  simples (seção 4).

Estes operadores e respectivas janelas, junto ao formalismo construído pelas Expressões 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6, conforme apresentado na seção 3, e aplicado nas seções 5 e 6, deverá contribuir no desenvolvimento de novos paradigmas de redes neurais morfológicas baseadas em células mais simples.

Portanto, quando comparada ao apresentado em Silva [10], esta nova abordagem também deverá levar vantagem em implementações via hardware, pois pode fazer uso de células mais simples, conforme apresentado nas seções 4, 5 e 6. Isto deverá favorecer a implementação de novos sensores inteligentes, baseados na tecnologia de *pixel ativo* (do inglês Active Pixel Sensors-APS) [31].

O paradigma apresentado *ainda* é incipiente, do ponto de vista de aplicações realistas, no entanto, quando sob a perspectiva da modelagem de *representação de formas*, o formalismo apresenta uma inspiração biológica próxima ao modelo proposto por Hubel e Wiesel [4,5], o qual pode ser uma alternativa simples e robusta quando comparada, por exemplo, ao modelo de agrupamento de células e respectivos campos receptivos do Neocognitron [41].

Isto é, o conjunto de operadores e janelas proposto, deverá modelar as *formas específicas* de qualquer agrupamento excitador, independente do nível de abstração, diretamente de possíveis células receptoras simples, tipo “cones e bastonetes artificiais”, ou de células mais complexas, quando necessário, conforme apresentado nas Figuras 5.2a e 5.2b.

Nesta primeira abordagem foi tratado o caso específico das células *on/off* artificiais e respectivos campos receptivos, em formato circular e em *linha* ou *barra*, capazes de representar e detectar uma forma específica tipo “barra de luz”, no entanto, os operadores morfológicos não se restringem a este tipo de *janela*. Isto é, futuros trabalhos poderiam contemplar formas mais complexas a partir de células *on/off* artificiais simples.

Por outro lado, dada a inspiração biológica de modelagem *direta* das células *on-off* em *janelas*, espera-se que o modelo de células e respectivos núcleos *on/off* apresentados sejam explorados em novas investigações considerando-se, por

exemplo, a *integração* (binding do inglês) da morfometria e das cores, inspiradas na “representação” biológica [41] de formas mais complexas [6,8,14,15,32].

#### REFERÊNCIAS

- [1] Kuffler, S. W.; Nicholls, J. G.; Martin, A. R. From Neuron to Brain: A cellular approach to the function of the Nervous System, 2<sup>nd</sup> edition, Sunderland, MA, Sinauer Associates, 651 p.1984.
- [2] Sherrington, C.S. The Integrative Action of Nervous System. New Haven: Yale University Press, 1906.
- [3] Hartline, H. K. The receptive fields of optic nerve fibers, American Journal of Physiology, vol. 130, pp. 690-699, 1940.
- [4] Hubel, D. H. & Wiesel, T. N. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. Journal of Physiology, 160, p. 106-154, 1962.
- [5] Hubel, D. H. Evolution of ideas on the primary visual cortex, 1955-1978: A biased historical account, Nobel lecture, Harvard Medical School, Boston, MA, pp. 24-56, 1981.
- [6] Kandel, E. R.; Schwartz, J. H.; Jessell, T. M. Principles of Neural Science, 4 ed., McGraw-Hill Medical, 1414 p., 2000.
- [7] Levine M.W. and Shefner, J.M. *Fundamentals of sensation and perception, 2nd ed.* Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, 1991.
- [8] Lent, R. Cem bilhões de neurônios: Conceitos fundamentais de neurociência, São Paulo, Ed. Atheneu, 698 p., 2001.
- [9] Kuffler, S. W. Discharge Patterns and Functional Organization of Mammalian Retina, Journal of Neurophysiology, v. 161, pp. 37, 1953.
- [10] Silva, F.A.T.F. Rede Morfológica Não Supervisionada-RMNS. Tese (Doutorado em computação aplicada), INPE-8759-TDI/800, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.
- [11] Silva, F.A.T.F.; Lucena, A.M.P. Silva Processamento Inteligente de Sinais aplicado ao Monitoramento Ambiental em Tempo Real. Anais do XII-Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia-GO, abril, 2005, 8p.
- [12] Silva, F.A.T.F.; Lucena, A.M.P. Sensores Inteligentes: Uma abordagem Simbólico-Conexionista. Anais do VI-Congresso Brasileiro de Redes Neurais-Centro Universitário da FEI, São Paulo-SP, junho, 2003, pp. 415-420.
- [13] Samuel, G. S.; White, A. J. R.; Martin, P. R. Extraclassical Receptive Field properties of Parvocellular, Magnocellular, and Koniocellular Cells in the Primate Lateral Geniculate Nucleus. Journal of Neuroscience, Jan, 2002, pp. 338-349.
- [14] Shabar, O. B.; Zucker, S. Geometrical Computations Explain Projection Patterns of Long-Range Horizontal Connections in Visual Cortex. Neural Computation 16, MIT Press, pp. 445-476, 2004.
- [15] Carlson, N.R. Physiology of Behavior, 7<sup>nd</sup>, Allyn and Bacon, 698 p., 2001.
- [16] Hecht, S.; Schlaer, S.; Pirenne, M. Energy, quanta and vision, J. Gen. Physiology, 25, pp. 819-840, 1942.
- [17] Meister, M.; Berry, M. J. The neural code of the Retina. Neuron, Cell Press, vol. 33, pp. 435-450, March, 1999.
- [18] Rempel, E. L., Silva, F. A. T. F. Reconhecimento de padrões invariante a rotação utilizando uma rede neural morfológica não supervisionada. V Congresso Brasileiro de Redes Neurais, Rio de Janeiro-RJ: v.cd, p. 109-112, 2001.
- [19] Serra, J. Image Analysis and Mathematical Morphology. Volume 1: Theoretical Advances. London: Academic Press, 1982.
- [20] Serra, J. Stereology and structuring elements. J. Microscopy, 1972, p. 93-103.
- [21] Matheron, G. Random sets and integrated geometry. New York: Wiley, 1975.
- [22] Serra, J. Thickenings, thinnings. Centre de morphologie mathématique, école nationale supérieure des mines de Paris, June, 1987.
- [23] Banon, G. J. F.; Barrera J. Decomposition of mappings between complete lattices by mathematical morphology-part I: general lattices. Signal Processing, 30(3):299-327, Feb. 1993.
- [24] Heijmans, H. J. A. M. Theoretical aspects of gray-level morphology. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 13, pp. 568-582, 1991.
- [25] Banon, G. J. F. Characterization of translation invariant elementary morphological operators between gray-level images. Relatório de pesquisa, INPE-5616-RPQ/671, INPE, São José dos Campos-SP-Brasil, Dezembro 1995.
- [26] Banon, G. J. F.; Faria, S. D. Morphological approach for template matching. SIBGRAP'97, IEEE Computer Society, 1997, p. 171-178.
- [27] Silva, F.A.T.F.; Banon, G.J.F. Rede Morfológica Não Supervisionada-RMNS. IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais, ITA, São José dos Campos-Brasil: v.cd., p. 400-405, 1999.
- [28] Davidson, J. L.; Hummer, F. Morphology neural networks: An introduction with applications. Circuits System Signal Process, (2), 1993, p. 179-210.
- [29] Wilson, S. S. Training structuring elements in morphological networks. Mathematical Morphology in Image Processing. Marcel Dekker, Inc., New York, 1993. p. 1-41.
- [30] Carpenter, G. A.; Grossberg, S. ART2: Self organization of stable category recognition codes for analog input patterns. Applied Optics, 26:4919-4930, 1987.
- [31] Koch, C. Vision Chips Implementing: Vision Algorithms with Analog VLSI Circuits. IEEE Computer Society Press, ISBN 0-8186-6492-4, 1995.
- [32] Country, N.; Marchand, E. Visual perception based on salient features. Proceedings of the 2003-Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, Nevada, Oct., pp. 1024-1029, 2003.
- [33] I. S. Jacobs and C. P. Bean, "Fine particles, thin films and exchange anisotropy," in *Magnetism*, vol. III, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271-350.
- [34] B. Smith, "An approach to graphs of linear forms," unpublished.
- [35] E. H. Miller, "A note on reflector arrays," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, to be published.
- [36] J. Wang, "Fundamentals of erbium-doped fiber amplifiers arrays," *IEEE J. Quantum Electron.*, submitted for publication.
- [37] C. J. Kaufman, Rocky Mountain Research Laboratories, Boulder, CO, private communication, 2004.
- [38] Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," *IEEE Transl. J. Magn. Jpn.*, vol. 2, pp. 740-741, August 1987 [*Dig. 9th Annual Conf. Magn. Jpn.*, p. 301, 1982].
- [39] M. Young, *The Technical Writer's Handbook*. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [40] Fukushima, K; Miyake, S. Ito, T. Neocognitron: A hierarchical neural network model for a mechanism of visual pattern recognition. IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics, 13:826-834, 1983.
- [41] Roelfsema, P.R. Elemental operations in vision. Trends in Cognitive Sciences Journal, vol. 9 (5):226-33, 2005.