Autômatos Adaptativos para Emparelhamento de Cadeias

E. S. C. Rodrigues, F. A. Rodrigues, R. L. A. Rocha

Resumo — Este artigo apresenta um modelo baseado em Autômatos Adaptativos para o problema de emparelhamento de cadeias. Este problema surge quando é necessário encontrar todas as ocorrências de uma determinada palavra em um texto. As soluções para o emparelhamento de cadeias também podem ser usadas para encontrar, por exemplo, padrões específicos em seqüências de DNA. Os autômatos adaptativos foram usados para criar um conjunto de submáquinas responsáveis pela construção de um autômato que reconhece apenas o padrão que se deseja encontrar. O autômato construído é utilizado posteriormente para encontrar suas ocorrências em um dado texto. O uso de autômatos finitos para encontrar padrões em tos tem vantagem sobre outras soluções, pois examinam cada caractere do texto somente uma vez. No entanto, nenhuma comparação foi feita entre o uso de autômatos finitos e de autômatos adaptativos.

Palavras chave— Autômatos Adaptativos (Adaptive Automata), Emparelhamento de Cadeias (Pattern Matching).

I. INTRODUÇÃO

Oproblema de emparelhamento de cadeias sempre surge quando uma seqüência de caracteres é procurada em um texto. Para entender o problema, suponha que P e T são duas cadeias de caracteres sobre o mesmo alfabeto finito Σ . Suponha também que m é o tamanho de P e que n é o tamanho de T, com $m \le n$. O padrão P é encontrado a partir da posição s+1 no texto T, se $0 \le s \le n-m$ e T[s+1...s+m] = P[1..m]. De forma equivalente, diz-se que o padrão P ocorre com deslocamento s em T. Neste caso, s é dito um deslocamento válido. Caso contrário, s é dito um deslocamento inválido. Quando uma seqüência de caracteres é buscada em um texto, deseja-se encontrar todos os deslocamentos válidos desta seqüência no texto. A Figura 1 mostra um exemplo de um deslocamento válido de um padrão em um texto, ambos sobre o alfabeto $\Sigma = \{a, b, c\}$.

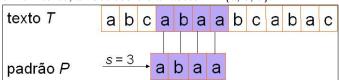


Fig. 1. Exemplo de um deslocamento válido do padrão abaa no texto T.

Vários algoritmos de emparelhamento de cadeias podem ser encontrados na literatura e todos são baseados nos conceitos apresentados acima[1]. O objetivo deste artigo é

apresentar uma solução para o emparelhamento de cadeias, baseada em Autômatos Adaptativos.

Os autômatos adaptativos são usados quando é desejável que a estrutura do modelo seja modificada durante sua execução. Em [2] foi mostrado através de vários exemplos, como os autômatos adaptativos podem ser empregados como ferramentas com grande potencial para representar soluções elegantes, eficientes, compactas e práticas para muitos problemas complexos.

Autômatos adaptativos são dispositivos que podem reagir a seus estímulos de entrada, modificando sua própria estrutura. Eles utilizam os autômatos de pilha estruturados [3] como seu formalismo não adaptativo subjacente.

Em [4] pode ser encontrada uma formulação geral para dispositivos adaptativos baseados em regras e que usam dispositivos não adaptativos subjacentes. Na mesma referência é mostrado um estudo de caso para a simulação de um autômato finito em uma Tabela de Decisão Adaptativa.

Os autômatos adaptativos são dispositivos computacionalmente equivalentes às Máquinas de Turing [5]. Portanto, eles podem reconhecer linguagens representadas por outros formalismos, além dos autômatos finitos. Esta característica motiva o seu uso, pois além da generalidade do modelo, ele possui a capacidade de aprendizagem através de sua auto-modificação.

Em [6] é descrita uma proposta de algumas restrições para o uso de autômatos adaptativos. Isto foi feito com o objetivo de facilitar a criação e a interpretação dos dispositivos sem perda de poder computacional.

A seção 2 apresenta a notação utilizada para representar as sub-máquinas e funções que compõem o modelo adaptativo. A seção 3 descreve o modelo para o problema de emparelhamento de cadeias utilizando autômatos adaptativos. Em seguida, na seção 4 são sugeridos alguns trabalhos futuros e na seção 5 são apresentadas as conclusões.

II. NOTAÇÃO DE AUTÔMATOS ADAPTATIVOS

Antes de apresentar o modelo desenvolvido, é necessário descrever a notação utilizada para a representação dos autômatos adaptativos.

As transições das sub-máquinas que compõem o modelo adaptativo são representadas por regras de produção com a seguinte forma: $(\gamma g, s, \sigma \alpha), \mathcal{A} : \rightarrow (\gamma g', s', \sigma' \alpha), \mathcal{B}$, em que:

- γ são meta-símbolos que representam o conteúdo da pilha não considerado pelo autômato (não influencia na aplicação da produção);
- g e g' representam o estado armazenado no topo da

E. S. C. Rodrigues e F. A. Rodrigues são alunos de Doutorado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (e-mail: elisangela.rodrigues@poli.usp.br; fabricio.rodrigues@poli.usp.br).

R. L. A. Rocha é professor Doutor da Universidade de São Paulo (e-mail: luis.rocha@poli.usp.br).

pilha antes e depois da aplicação da transição, respectivamente;

- s e s' representam o estado corrente da transição e o próximo estado, respectivamente;
- σ é o símbolo do alfabeto que será consumido da cadeia e σ' é o símbolo do alfabeto que será empilhado na cadeia (ambos podem ser iguais a cadeia vazia, representada pelo símbolo ε);
- α são meta-símbolos que representam o restante da cadeia não considerada pelo autômato (não influencia na aplicação da produção);
- A e B são chamadas a funções adaptativas a serem executadas antes e depois da mudança de estados determinada pela produção. As funções adaptativas podem ter n parâmetros e assumem a seguinte forma A(a₁, a₂, ...,a_n), em que a_i são argumentos que assumirão valores a serem usados no corpo da função. As funções adaptativas são declaradas conforme descrito em [3].

III. MODELO PROPOSTO

No problema de emparelhamento de cadeias usando autômatos, para cada padrão a ser procurado no texto, um autômato que reconheça somente aquele padrão deve ser construído. A busca por um padrão em um texto é feita em duas etapas: a primeira etapa é a construção do autômato (préprocessamento); a segunda etapa é o uso do autômato construído para realizar a busca e encontrar todas as ocorrências do padrão no texto. A seguir, será descrito um modelo que utiliza autômatos adaptativos na fase de construção do autômato usado na busca. O modelo também possui uma função adaptativa que será usada somente durante a busca do padrão no texto.

Para facilitar a compreensão do modelo, o alfabeto foi limitado a apenas dois elementos. Suponha que o alfabeto seja $\Sigma = \{0, 1\}$ e que o padrão a ser buscado no texto seja $P = 01 \mid -$. O traço de asserção ($\mid -$) é usado para delimitar o final do padrão.

A idéia geral do modelo é que a cada símbolo lido no padrão, um novo estado seja criado e novas transições sejam inseridas para todos os símbolos do alfabeto. Para criar estas transições é necessário saber qual o estado destino para cada símbolo, pois é possível que haja sobreposição de símbolos de ocorrências sucessivas do padrão no texto. Por exemplo, se o padrão é 010 e o texto é 01010, então o último zero da primeira ocorrência do padrão é o primeiro zero da segunda ocorrência do padrão no texto.

Com o objetivo de criar um autômato determinístico para ser usado na busca, é necessário saber, para qualquer estado, qual o próximo estado para cada símbolo do alfabeto. Considerando-se as sobreposições possíveis, é preciso determinar se a função cria um novo estado ou cria uma transição para um estado já existente com cada símbolo do alfabeto.

Para solucionar este problema, é necessário encontrar o maior prefixo de P que é um sufixo da subcadeia que já é

reconhecida pelo autômato, concatenado com o símbolo para o qual será criada a transição. Uma cadeia w é um prefixo de uma cadeia x, se x=wy para alguma cadeia $w\in \Sigma^*$ e alguma cadeia $y\in \Sigma^*$. Da mesma forma, uma cadeia w é um sufixo de uma cadeia x, se x=yw para alguma cadeia $w\in \Sigma^*$ e alguma cadeia $y\in \Sigma^*$.

É necessário que a máquina conheça o comprimento do prefixo mais longo de *P*, que é um sufixo da subcadeia lida até o momento [1]. Este procedimento inicia-se com a passagem do símbolo lido no padrão para uma função adaptativa responsável por criar um novo estado em uma sub-máquina, que irá reconhecer o padrão lido até o momento. Em seguida, uma sub-máquina empilha na cadeia os símbolos anteriormente lidos em ordem invertida, que representam o prefixo de *P*, para fins de comparação com a sub-cadeia lida até o momento. Os símbolos são empilhados em ordem invertida porque é preciso verificar se este prefixo é um sufixo da cadeia lida até então.

Para separar o prefixo de *P* dos símbolos que ainda não foram lidos do padrão, é usado o símbolo especial #. A sub-máquina que reconhece o padrão lido até o momento é executada consumindo os símbolos empilhados na cadeia até encontrar o símbolo #. À medida que os símbolos são consumidos e a sub-máquina muda de estado, um estado equivalente no autômato final aponta para o estado de destino de acordo com o símbolo que se deseja inserir a transição. Portanto, cada vez que o sufixo é encontrado, uma máquina com um ponteiro para o estado correspondente indica qual estado deve receber a transição.

O autômato adaptativo para o problema de emparelhamento de cadeias será composto por cinco sub-máquinas. A sub-máquina principal responsável pelo reconhecimento do padrão no texto é Z. Nesta sub-máquina, Z0 é o estado inicial e ZF é o estado final. A definição de Z é mostrada abaixo.

As sub-máquinas que representam, respectivamente, a sub-cadeia de *P* que já foi lida até o momento e que será usada para determinar o próximo estado de cada transição inserida, o prefixo de *P* que será inserido novamente na cadeia em ordem inversa, o contador de ocorrências do padrão no texto e o maior prefixo de *P* que é um sufixo da sub-cadeia lida, são PQ, PK, A e PC, conforme definidas abaixo. Os estados iniciais de PQ, PK, A e PC são PQ0, PK0, A0 e PC0, respectivamente. Da mesma forma, os estados finais são PQ1, PK2, A1 e PC2.

```
PQ:
                                                                          (\varepsilon, PQ0, \varepsilon) :\rightarrow (\varepsilon, PQ1, \varepsilon)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, PZ, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, y, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            ? [(\varepsilon, z, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, PC2, \varepsilon)]
                                                                                                  (\varepsilon, PQ0, \#\alpha) :\rightarrow (\varepsilon, PQ1, \alpha)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            \{-[(\varepsilon, t, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, z, \beta)] \ \forall \beta \in \Sigma\}
                                                                                                   (\gamma \pi, PQ1, \varepsilon) : \rightarrow (\gamma, \pi, \varepsilon)
                        PK:
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            +[(\varepsilon, t, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, PC2, \varepsilon))]
                                                                          (\varepsilon, PK0, \alpha) :\rightarrow (\varepsilon, PK1, \#\alpha)
                                                                                                  (\epsilon, PK1, \epsilon) :\rightarrow (\epsilon, PK2, \epsilon)
                                                                                                                                                                                                                                                                  C() = \{g1^*, g2^*, g21^*, g22^*, g3^*, g4^*, g5^*, g6^*, g61^*, g61^*,
                                                                                                                                                                                                                                        g62*, g7*, g8*, x, y, z, w, t:
                                                                                                  (\gamma \pi, PK2, \varepsilon) : \rightarrow (\gamma, \pi, \varepsilon)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           -[(\varepsilon, PZ, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, x, \varepsilon)]
                        A:
                                                                                                  (\varepsilon, A0, \varepsilon) :\rightarrow (\varepsilon, A1, \varepsilon)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           -[(\epsilon, PO, \epsilon) : \rightarrow (\epsilon, y, \epsilon)]
                                                                                                  (\gamma \pi, A1, \varepsilon) : \rightarrow (\gamma, \pi, \varepsilon)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           -\left[(\epsilon,z,\epsilon):\to(\epsilon,ZI,\epsilon)\right]
                        PC:
                                                                          (\varepsilon, PC0, \alpha) :\rightarrow (\varepsilon, PC1, \#\alpha)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, z, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, ZF, \varepsilon), G()]
                                                                                                  (\varepsilon, PC1, \varepsilon) :\rightarrow (\varepsilon, PCF, \varepsilon)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, PZ, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, z, \varepsilon)]
                                                                                                   (\gamma \pi, PC2, \varepsilon) : \rightarrow (\gamma, \pi, \varepsilon)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, PO, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, z, \varepsilon)]
                        As funções adaptativas \mathcal{B}, \mathcal{C}, \mathcal{D}, \mathcal{E}, \mathcal{F}, \mathcal{G} e \mathcal{H}, \mathcal{I} e \mathcal{I} são
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            -[(\varepsilon, ZV, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, ZF, \varepsilon)]
declaradas da seguinte forma:
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, ZV, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, g1, \varepsilon), \mathcal{D}(0)]
                        \mathcal{B}(\sigma) = \{g1^*, x, y, z:
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\gamma, g1, \varepsilon) : \rightarrow (\gamma g2, PK0, \varepsilon)]
                                                                                                   -[(\varepsilon, x, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, ZI, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + (\varepsilon, g2, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, g21, \varepsilon), I(PK1,
                                                                                                   + [(\varepsilon, x, \sigma\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, g1, \alpha)]
                                                                                                                                                                                                                                        PC1)
                                                                                                  + [(\varepsilon, g1, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, ZI, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + (\varepsilon, g21, \varepsilon) :\rightarrow (\varepsilon, g22, \varepsilon), \mathcal{I}()
                                                                                                  -\left[(\epsilon,PZ,\epsilon):\rightarrow(\epsilon,y,\epsilon)\right]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\gamma, g22, \varepsilon) : \rightarrow (\gamma g3, PQ0, \varepsilon)]
                                                                                                  -\left[(\epsilon,PO,\epsilon):\rightarrow(\epsilon,z,\epsilon)\right]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, g3, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, g4, \varepsilon), \mathcal{H}(0)]
                                                                                                  + [(\varepsilon, PZ, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, x, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, g4, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, g5, \varepsilon), \mathcal{D}(1)]
                                                                                                  + [(\varepsilon, PO, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, x, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\gamma, g5, \varepsilon) : \rightarrow (\gamma g6, PK0, \varepsilon)]
                                                                                                  -\left[(\epsilon,ZJ,\epsilon):\rightarrow(\epsilon,ZK,\epsilon)\right]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + (\varepsilon, g6, \varepsilon): \rightarrow (\varepsilon, g61, \varepsilon), I(PK1,
                                                                                                   \{-[(\epsilon, ZJ, \epsilon) : \rightarrow (\epsilon, ZK, \epsilon), \mathcal{D}(\theta)] \ \forall \theta
                                                                                                                                                                                                                                        PC1)
\in \Sigma
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + (\varepsilon, g61, \varepsilon) :\rightarrow (\varepsilon, g62, \varepsilon), \mathcal{I}()
                                                                                                   \{+ [(\varepsilon, ZJ, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, ZK, \varepsilon), \mathcal{D}(\rho)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\gamma, g62, \varepsilon) : \rightarrow (\gamma g7, PQ0, \varepsilon)]
\forall \rho \in \Sigma - {\sigma}
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, g7, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, g8, \varepsilon), \mathcal{H}(1)]
                                                                                                  -[(\varepsilon, ZT, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, ZW, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, g8, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, ZF, \varepsilon)]
                                                                                                   \{-[(\epsilon, ZT, \epsilon) : \rightarrow (\epsilon, ZW, \epsilon), \mathcal{E}(\theta)]\}
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            ? [(\epsilon, z, 0\alpha) : \rightarrow (\epsilon, w, \alpha)]
\forall \theta \in \Sigma
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, ZF, 0\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, w, \alpha)]
                                                                                                   \{+ [(\varepsilon, ZT, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, ZW, \varepsilon), \mathcal{E}(\rho)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            ? [(\epsilon, z, 1\alpha) : \rightarrow (\epsilon, t, \alpha)]
\forall \rho \in \Sigma - {\sigma}}
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, ZF, 1\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, t, \alpha)]
                         \mathcal{D}(\sigma) = \{g1^*, g2^*, g3^*, x:
                                                                                                                                                                                                                                                                 \mathcal{H}(\sigma) = \{g1^*, g2^*, x, y, z, w:
                                                                                                  -[(\varepsilon, PQ0, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, x, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             -[(\varepsilon, PQ0, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, x, \varepsilon)]
                                                                                                  +\left[(\epsilon,PQ0,\epsilon):\rightarrow(\epsilon,g1,\epsilon)\right]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            ? [(\varepsilon, x, \sigma\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, y, \alpha)]
                                                                                                  + [(\epsilon, g1, \sigma\alpha) : \rightarrow (\epsilon, x, \alpha)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + \left[ (\epsilon, PQ0, \epsilon) : \rightarrow (\epsilon, y, \epsilon) \right]
                                                                                                   + [(\varepsilon, g1, \#\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, PQ1, \alpha)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            -[(\varepsilon, PZ, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, z, \varepsilon)]
                                                                                                   \{+[(\varepsilon, g1, \rho\alpha): \rightarrow (\varepsilon, g2, \alpha), \mathcal{F}()]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            ? [(\varepsilon, PO, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, w, \varepsilon)]
\forall \rho \in \Sigma - {\sigma}
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, w, \sigma\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, z, \alpha)]
                                                                                                   \{+[(\epsilon, \, g2, \, \beta\alpha): \to (\epsilon, \, g2, \, \alpha)] \,\, \forall \beta \in \, \Sigma
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, PZ, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, w, \varepsilon)]
                                                                                                  +[(\varepsilon, g2, \#\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, g3, \alpha)]
                                                                                                                                                                                                                                                                  G() = \{g1*, x:
                                                                                                   + [(\gamma, g3, \varepsilon) : \rightarrow (\gamma PQ0, PC0, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           -[(\varepsilon, x, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, A1, \varepsilon)]
                        \mathcal{E}(\sigma) = \{g1^*, g2^*, x, y, z, w, t, u: \}
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, x, +) : \rightarrow (\varepsilon, g1, \varepsilon)]
                                                                                                   -[(\varepsilon, PQ0, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, x, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, g1, +) : \rightarrow (\varepsilon, A1, \varepsilon)]
                                                                                                  ? [(\varepsilon, x, \sigma\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, y, \alpha)]
                                                                                                   ? [(\varepsilon, PZ, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, z, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                 I(\sigma 1, \sigma 2) = \{g1^*, x, y, z:
                                                                                                  ? [(\varepsilon, PO, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, w, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            -[(\varepsilon, \sigma 2, \alpha) : \rightarrow (\varepsilon, y, \phi \alpha)] \forall \phi \in \Sigma
                                                                                                  + [(\epsilon, w, \sigma\alpha) : \rightarrow (\epsilon, z, \alpha)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            -[(\varepsilon, \sigma 2, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, y, \varepsilon)]
                                                                                                  -[(\varepsilon, t, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, PK2, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, \sigma 2, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, PCF, \varepsilon)]
                                                                                                   \{+ [(\varepsilon, t, \alpha) : \rightarrow (\varepsilon, g1, \rho\alpha)] \ \forall \rho \in \Sigma - \}
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            \{? [(\varepsilon, \sigma 1, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, x, \beta)] \ \forall \beta \in \Sigma\}
\{\sigma\}\}
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, \sigma 2, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, g1, \beta)]
                                                                                                  + [(\varepsilon, g1, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, PK2, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            ? [(\varepsilon, z, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, g1, \beta)]
                                                                                                   + [(\epsilon, PQ0, \epsilon) : \rightarrow (\epsilon, g2, \epsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            -[(\varepsilon, z, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, PCF, \varepsilon)]
                                                                                                   \{+\left[(\epsilon,g2,\rho\alpha):\rightarrow(\epsilon,y,\alpha)\right]\ \forall\rho\in\Sigma\,-
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, g1, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, PCF, \varepsilon)]
\{\sigma\}\}
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            I(x, g1)
                                                                                                  + [(\varepsilon, g2, \#\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, PQ1, \alpha)]
                                                                                                                                                                                                                                                                 \mathcal{I}() = \{x, y:
                                                                                                   ?[(\varepsilon, x, \rho\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, u, \alpha), \mathcal{F}()]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            ? [(\varepsilon, x, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, PCF, \varepsilon)]
\forall \rho \in \Sigma - \{\sigma\}\}
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            \{? \left[ (\epsilon, y, \epsilon) : \rightarrow (\epsilon, x, \beta) \right]
                                                                                                  + [(\varepsilon, g2, \sigma\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, u, \alpha), \mathcal{F}()]
                                                                                                                                                                                                                                         \forall \beta \in \Sigma \cup \{\#\}\}
                         F() = \{x, y, z, t: 
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           -[(\varepsilon, x, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, PCF, \varepsilon)]
                                                                                                  -[(\varepsilon, PZ, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, x, \varepsilon)]
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            + [(\varepsilon, x, \varepsilon) : \rightarrow (\varepsilon, PC2, \varepsilon)]
                                                                                                   \{? [(\varepsilon, y, \sigma\alpha) : \rightarrow (\varepsilon, x, \alpha)] \ \forall \sigma \in \Sigma\}
                                                                                                                                                                                                                                                                 Esta solução foi criada para um alfabeto de apenas dois
```

símbolos. No entanto, é possível ampliar esta solução para qualquer alfabeto. Para cada símbolo do alfabeto seria necessário incluir uma função adaptativa para incluir uma transição para os demais símbolos. Portanto, quanto maior o tamanho do alfabeto, mais funções adaptativas são necessárias.

Após todo o padrão ter sido varrido e o autômato ter sido criado, o símbolo | é encontrado. Neste caso, uma função adaptativa é executada para remover as transições com a função que criava os estados e acrescentava as transições. Além disso, a função insere uma ação adaptativa na transição que chega ao estado final. Esta ação inserida será executada na etapa da busca para contar o número de ocorrências do padrão procurado no texto.

Uma vez que o autômato foi construído, começa a etapa de busca no texto. A Figura 2 ilustra o uso do autômato construído para efetuar a busca em um determinadno texto T. A busca inicia no primeiro símbolo do texto e vai consumindo cada símbolo até atingir o final. O autômato muda de estado de acordo com cada símbolo lido no texto. Cada vez que o autômato alcança o estado final significa que o padrão foi encontrado no texto.

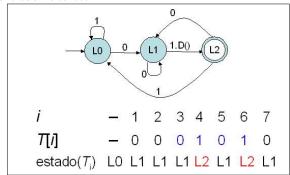


Fig. 2. Exemplo de busca em texto.

Para saber o deslocamento do padrão no texto, basta subtrair o valor da posição do texto em que o padrão terminou pelo tamanho do padrão. A função adaptativa que é executada cada vez que um padrão é encontrado no texto, cria um autômato que representa a quantidade de vezes que o padrão ocorreu no texto.

IV. TRABALHOS FUTUROS

Apesar do uso de autômatos adaptativos para o problema de emparelhamento de cadeias ter sido proposto neste artigo, esta solução ainda não foi implementada completamente. A versão implementada atualmente já conta com duas funções adaptativas: uma para a criação da submáquina principal e outra para a criação da máquina que representa a quantidade de ocorrências do padrão no texto.

Desta forma, pretende-se implementar completamente a solução para o problema de emparelhamento de cadeias proposta neste artigo.

Além do modelo apresentado, é possível criar outras funções adaptativas para a fase de busca. Esta é uma sugestão para trabalhos futuros.

Uma outra sugestão, é a criação de outras funções adaptativas que reaproveitem os estados e transições de um autômato para a busca de novos padrões.

Também faz-se necessário um estudo sobre a complexidade de tempo e espaço de um modelo baseado em autômatos adaptativos para o problema de emparelhamento de cadeias, bem como uma comparação com outras técnicas existentes.

V. CONCLUSÕES

A tecnologia adaptativa pode ser muito útil para a representação de diversos problemas. Isto porque, a capacidade de auto-modificação em sua estrutura, permite agregar conceitos desejáveis em um modelo, como por exemplo, a aprendizagem.

O modelo apresentado neste artigo é mais uma solução para o problema de emparelhamento de cadeias. Este trabalho contribuiu com mais uma aplicação dos autômatos adaptativos para a solução de problemas computacionais.

REFERÊNCIAS

- T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, *Algoritmos: Teoria e Prática*, Tradução da 2ª edição americana, Editora Campus, 2002.
- [2] J. J. Neto, Solving Problems Efficently with Adaptive Automata, CIAA 2000 – Fifth International Conference on Implementation and Application of Automata, July 2000 – London, Ontario, Canada.
- [3] J. J. Neto, Adaptive automata for context-dependent languages, ACM SIGPLAN Notices, Vol 29, n. 9, pp 15 24, 1994.
- [4] J. J. Neto, Adaptive Rule-Driven Devices General Formulation and Case Study, Lecture Notes in Computer Science, Watson, B.W. and Wood, D. (Eds.): Implementation and Application of Automata 6th International Conference, CIAA 2001, Vol.2494, Pretoria, South Africa, July 23-25, Springer-Verlag, 2002, pp. 234-250.
- [5] R. L. A. Rocha e J. J. Neto, Autômato adaptativo, limites e complexidade em comparação com máquina de Turing, In: Proceedings of the Second Congress of Logic Applied to Technology – LAPTEC'2000, São Paulo: Faculdade SENAC de Ciências Exatas e Tecnologia, pp. 33-48, 2001.
- [6] J. J. Neto e C. A. B. Pariente, Adaptive Automata a reduced complexity proposal, In: Seventh Intenational Conference on Implementation and Application of Automata, CIAA 2002, Tours, Pre-proceedings Seventh Intenational Conference on Implementation and Application of Automata, CIAA 2002, Tours France: University of Tours, 2002, pp. 161 170.

Elisângela Rodrigues nasceu em Pelotas/RS, Brasil, em 18 de abril de 1978. Graduou-se em Informáica pela Universidade Federal de Pelotas em 2000 e obteve o título de Mestre em Informática pela Universidade Federal de Campina Grande em 2002. Iniciou suas atividades docentes em 2002, na Faculdade de Tecnologia e Ciências de Feira de Santana/BA, onde atuou até 2005. Neste mesmo ano, transferiu-se para a Faculdade ÁREA1 em Salvador/BA, onde atuou até 2007. Em 2006, participou como pesquisadora bolsista (com bolsa da Petrobrás) do Projeto Sistema de Gerenciamento de Poços Automatizados (SGPA), na Universidade Federal da Bahia. Atualmente, é aluna regular do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em regime integral.

Fabrício Rodrigues nasceu em Mossoró/RN, Brasil, em 09 de agosto de 1973. Graduou-se em Sistemas de Informação pela Universidade Potiguar em 2000 e obteve o título de Mestre em Informática pela Universidade Federal de Campina Grande em 2002. Iniciou suas atividades docentes em 2002, na Faculdade de Tecnologia e Ciências de Feira de Santana/BA, onde atuou até 2005. Neste mesmo ano, transferiu-se para a Faculdade ÁREA1 em Salvador/BA, onde atuou até 2007, além de atuar como Chefe do Núcleo de Computação. Atualmente, é aluno regular do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em regime integral.