

# Máquina de Turing e máquina de Turing universal

Rodrigo Santos de Souza

<sup>1</sup> Universidade Católica de Pelotas - UCPel  
Mestrado em Ciência da Computação  
Disciplina de Teoria da Computação  
Prof. Antônio Carlos da Rocha Costa

***Resumo.** Este trabalho descreve a máquina de Turing e a máquina de Turing universal segundo a ótica de duas bibliografias distintas. O objetivo é resumidamente apresentar o que é cada máquina e quais suas características apontadas pelos livros *Elementos de Teoria da Computação*, de autoria de Harry R. Lewis e Christos H. Papadimitriou e *Teoria da Computação Máquinas Universais e Computabilidade*, de Tiarajú A. Diverio e Paulo B. Menezes.*

## 1. Introdução

A máquina de Turing foi proposta por Alan Turing em 1936 e embora tenha sido criada anos antes do primeiro computador digital, tem uma grande importância para a ciência da computação, pois possui no mínimo o mesmo poder computacional de qualquer computador de propósito geral. Devido a sua importância, este texto tem o objetivo de apresentar a máquina de Turing e a máquina de Turing universal segundo a ótica de dois livros, são eles: *Elementos de Teoria da Computação*, de autoria de Harry R. Lewis e Christos H. Papadimitriou e *Teoria da Computação Máquinas Universais e Computabilidade*, de Tiarajú A. Diverio e Paulo B. Menezes. A organização do texto traz dois capítulos distintos em que cada um trata o assunto segundo a visão de cada um dos livros.

## 2. Livro: *Elementos de Teoria da Computação (Harry R. Lewis e Christos H. Papadimitriou)*

### 2.1. Máquina de Turing

Os aspectos básicos das máquinas de Turing são semelhantes aos dos Autômatos Finitos e Autômatos de Pilha, mas são capazes de reconhecer linguagens que são impossíveis para estes autômatos. A sua forma básica consiste de um controle finito, uma fita e um cabeçote que pode realizar leituras ou escritas na fita (ver Figura 1). Existem outras formas mais sofisticadas das máquinas de Turing que se utilizam de múltiplas fitas, máquinas com dispositivos de memória que podem ser lidos ou gravados em regime de acesso aleatório, mas nenhum dos modelos apresenta um poder computacional maior do que a forma básica. Uma visão amplamente aceita é de que qualquer forma aceitável de expressão das idéias contidas em um “algoritmo” seja, em última instância, equivalente à que pode se obter empregando-se uma máquina de Turing.

A máquina de Turing foi idealizada para satisfazer os seguintes critérios:

- Devem operar como Autômatos.
- Devem ser simples de descrever, de definir e de entender.
- Podem apresentar a maior generalidade possível quanto às computações que podem realizar.

Uma máquina de Turing consiste de um controle de estados finito associado a uma unidade de fita. A comunicação entre ambas é proporcionada por um simples cabeçote responsável pela leitura e escrita dos símbolos na fita. A unidade de controle opera de forma que a cada passo ela realiza duas operações, que dependem do seu estado atual e do símbolo lido da fita pelo cabeçote:

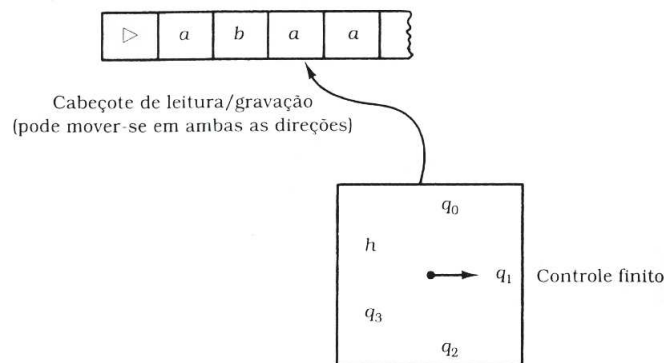
1. Levar a unidade de controle para um novo estado.
2. Gravar um símbolo na célula na posição apontada pelo cabeçote, ou então Mover o cabeçote uma posição, para a esquerda ou direita.

A fita é delimitada na extremidade esquerda, mas pode estender-se indefinidamente para a direita. Para delimitar a extremidade esquerda utiliza-se o símbolo  $\triangleright$  e sempre que o cabeçote encontrar este símbolo, move-se automaticamente uma posição para a direita. Uma máquina de Turing é alimentada gravando-se previamente a cadeia de entrada nas células mais a esquerda da fita, imediatamente a direita do símbolo  $\triangleright$ , sendo o restante da fita preenchido com espaços em branco, representados pelo símbolo  $\sqcup$ . Os símbolos  $\leftarrow$  e  $\rightarrow$  denotam o movimento do cabeçote, para esquerda ou para direita, respectivamente, sendo que nenhum dos dois podem ser membro de qualquer alfabeto utilizado. A máquina é livre para modificar o conteúdo de qualquer posição da fita, seja na sua cadeia de entrada assim como nos infinitos espaços em brancos existentes a direita dela [Lewis 2000].

### 2.1.1. Definição formal da máquina de Turing:

Uma máquina de Turing é uma quintupla  $(K, \Sigma, \delta, s, H)$ , onde

- $K$ : É um conjunto finito de estados;
- $\Sigma$ : É o alfabeto de entrada;
- $s$ : É o estado inicial. Sendo que  $s \in K$ ;
- $H$ : É o conjunto de estados de parada. Sendo que  $H \subseteq K$ ;
- $\delta$ : A função de transição, é uma função de  $(K - H) \times \Sigma$  para  $K \times (\Sigma \cup \{\rightarrow, \leftarrow\})$ , tal que,
  - para todos os  $q \in K - H$ , se  $\delta(q, \triangleright) = (p, b)$ , então  $b = \sqcup$
  - para todos os  $q \in K - H$  e  $a \in \Sigma$ , se  $\delta(q, a) = (p, b)$ , então  $b \neq \triangleright$



**Figure 1.** MODELO BÁSICO DE UMA MÁQUINA DE TURING

### Exemplo:

Considera-se uma máquina de Turing  $M = (K, \Sigma, \delta, s, \{h\})$ , onde

$$K = \{q_0, q_1, h\}$$

$$\Sigma = \{a, \sqcup, \triangleright\}$$

$$s = q_0$$

Sendo  $\delta$  dado pela tabela abaixo:

$q$	$\sigma$	$\delta(q, \sigma)$
$q_0$	$a$	$(q_1, \sqcup)$
$q_0$	$\sqcup$	$(h, \sqcup)$
$q_0$	$\triangleright$	$(q_0, \rightarrow)$
$q_1$	$a$	$(q_0, a)$
$q_1$	$\sqcup$	$(q_0, \rightarrow)$
$q_1$	$\triangleright$	$(q_1, \rightarrow)$

A máquina  $M$  inicia no estado  $q_0$  e move seu cabeçote para a direita substituindo todos os caracteres  $a$  por  $\sqcup$  a medida que vai avançando na fita. Quando encontra o caracter  $\sqcup$  a máquina pára.

Supondo que a fita inicialmente tenha o seguinte estado inicial e que o cabeçote está posicionado no primeiro  $a$  a esquerda:

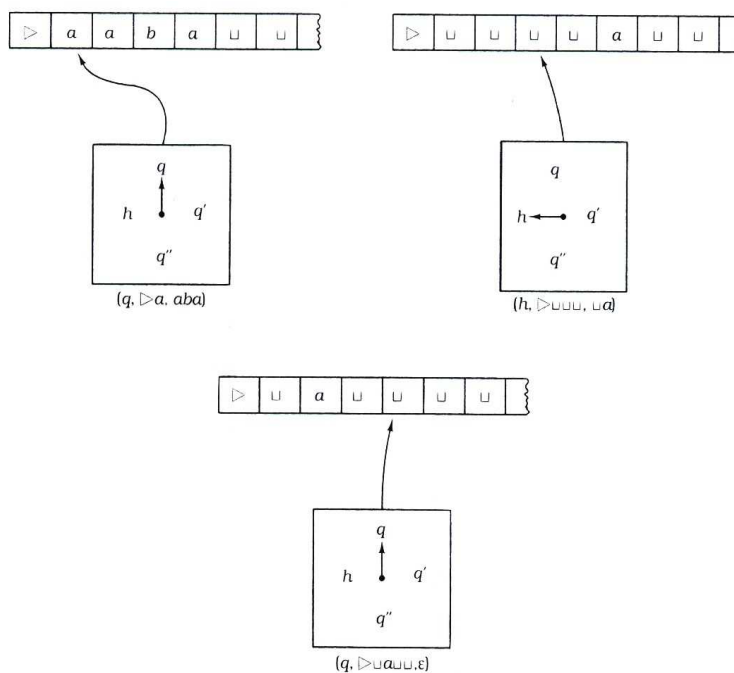
$\triangleright$	$a$	$a$	$a$	$a$	$\sqcup$	$\sqcup$	...
------------------	-----	-----	-----	-----	----------	----------	-----

O estado de  $M$  se alternará entre os estados  $q_0$  e  $q_1$  quatro vezes utilizando o  $\delta$  das linhas primeira e quinta, substituindo os caracteres  $a$  que for encontrado por  $\sqcup$ . Transcorrido estes passos,  $M$  estará no estado  $q_0$  tendo como símbolo de entrada o  $\sqcup$  e assim o  $\delta$  utilizado será o da segunda linha, trocando o estado para  $h$ , forçando a parada da máquina.

Para caracterizar o andamento de uma computação em uma máquina de Turing é necessário especificar seu estado, o conteúdo de sua fita de entrada e a posição do cabeçote sobre a fita. Uma vez executando-se uma parcela finita do início da fita, todos as demais posições estarão com espaços em branco. A cadeia de entrada será particionada em duas partes: a parte da esquerda terá os caracteres a esquerda do cabeçote de leitura incluindo o caractere corrente, a parte da direita terá todos os caracteres a direita do cabeçote. A parte da esquerda sempre começa como o caracter  $\triangleright$  e a parte da direita nunca termina com um espaço em branco, convencioando-se que todos os demais espaços a direita do último símbolo representado são supostamente espaços vazios. Assim, pode-se representar um configuração de uma máquina de Turing da seguinte forma:  $(q, \triangleright a, aba)$ , sendo que  $q$  é o estado da máquina,  $\triangleright a$  são os caracteres a esquerda do cabeçote e  $aba$  os caracteres a direita (ver Figura 2). De forma simplificada pode-se representar a mesma configuração da seguinte forma:  $(q, \triangleright \underline{a} aba)$ , em que o caracter sublinhado é a posição corrente do cabeçote.

### 2.1.2. Máquinas Básicas

As máquinas básicas são as máquinas usadas para gravar símbolos na fita e as empregadas para deslocar o cabeçote sobre a fita. A máquina usada para gravar um caracter na fita



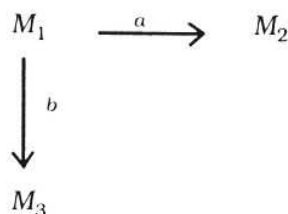
**Figure 2.** CONFIGURAÇÃO DE MÁQUINA DE TURING

será abreviada usando-se o próprio caracter, por exemplo a máquina  $a$  é uma máquina que grava um caracter  $a$  na posição corrente da fita.

As máquinas  $R$  e  $L$  são as que fazem deslocar o cabeçote sobre a fita, sendo que  $R$  desloca o cabeçote para a direita e  $L$  para a esquerda.

### 2.1.3. Regras para combinar máquinas

As máquinas de Turing podem ser combinadas para formarem máquinas mais evoluídas e formando estruturas semelhantes aos Autômatos Finitos. Desta forma, as máquinas individualmente podem ser comparadas aos estados nos autômatos, sendo que uma só pode iniciar depois que outra parar (ver Figura 3).



**Figure 3.** COMBINAÇÃO DE MÁQUINAS DE TURING

## 2.2. Máquina de Turing universal

A máquina de Turing universal é uma máquina genérica capaz de ser programada podendo comportar-se como uma máquina específica, permitindo assim solucionar qualquer problema passível de resolução por uma máquina de Turing. O formalismo da máquina de

Turing pode ser interpretado como uma linguagem de programação, permitindo que se escreva programas que podem ser interpretada por uma máquina de Turing Universal, isto é por um outro programa escrito na mesma linguagem.

Para que as máquinas de Turing possam ser utilizadas como entrada para outras máquinas, terá que ser feita uma especificação geral, criando uma linguagem em que as cadeias sejam uma representação legítimas de máquinas de Turing. É necessário que se utilize um alfabeto fixo, para isso será usada a seguinte convenção: a cadeia que representa o estado da máquina de Turing será da forma  $\{q\}\{0, 1\}^*$ , isto é, a letra  $q$  seguida por uma cadeia binária e os símbolos da fita serão representados por uma cadeia da forma  $\{a\}\{0, 1\}^*$ [Lewis 2000].

Seja  $M = (K, \Sigma, \delta, s, H)$  uma máquina de Turing. Sejam  $i$  e  $j$  inteiros, tais que  $2^i \geq |K|$  e  $2^j \geq |\Sigma| + 2$ . Assim cada estado do conjunto  $K$  será representado pelo símbolo  $q$  seguido de uma cadeia binária de comprimento  $i$  e cada símbolo do conjunto  $\Sigma$  representado pelo símbolo  $a$  seguido de uma cadeia de  $j$  bits. Os símbolos  $\leftarrow$  e  $\rightarrow$  também serão considerados símbolos da fita (esta é a razão do do termo  $+2$ ). Por convenção, os símbolos  $\sqcup, \triangleright, \leftarrow$  e  $\rightarrow$  serão representados por:  $a0^j, a0^{j-1}, a0^{j-2}10$  e  $a0^{j-3}11$  respectivamente. O estado inicial da máquina será sempre representado por  $q0^i$ .

Deve-se referenciar por “ $M$ ” a representação de uma máquina de Turing  $M$ . Esta representação consiste na tabela de transição  $\delta$ , que assume a forma  $(q, a, p, b)$ , onde  $q$  e  $p$  representam estados e  $a$  e  $b$  símbolos, todos separados por vírgula e incluídos entre parentese. Por convenção será adotado que as quádruplas são reelecionadas em ordem crescente, começando por  $\delta(s, \sqcup)$ . Se  $M$  decide uma linguagem  $L$ , portanto,  $H = \{y, n\}$ , adotaremos que  $y$  seja o menor dos dois argumentos de parada.

**Exemplo:**

Considere a máquina de Turing  $M = (K, \Sigma, \delta, s, \{h\})$ , onde  $K = \{s, q, h\}$ ,  $\Sigma = \{\sqcup, \triangleright, a\}$  e  $\delta$  é dado pela tabela:

estado	símbolo	$\delta$
$s$	$a$	$(q, \sqcup)$
$s$	$\sqcup$	$(h, \sqcup)$
$s$	$\triangleright$	$(s, \rightarrow)$
$q$	$a$	$(s, a)$
$q$	$\sqcup$	$(s, \rightarrow)$
$q$	$\triangleright$	$(q, \rightarrow)$

Os estados e símbolos ficam sa seguinte forma:

estado/símbolo	representação
$s$	$q00$
$q$	$q01$
$h$	$q11$
$\sqcup$	$a000$
$\triangleright$	$a001$
$\leftarrow$	$a010$
$\rightarrow$	$a011$
$a$	$a100$

A representação da cadeia  $\triangleright aa \sqcup a$  será  $a001a100a100a000a100$ .

A representação de “ $M$ ” será da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{“}M\text{”} = & (q00, a100, q01, a000), (q00, a000, q11, a000), \\ & (q00, a001, q00, a011), (q01, a100, q00, a011), \\ & (q01, a001, q00, q011), (q01, a001, q01, a011). \end{aligned}$$

A máquina de Turing universal  $U$  que utiliza como programa a codificação de outras máquinas, necessita como parâmetros, uma descrição “ $M$ ” de uma máquina de Turing  $M$  e uma descrição “ $\omega$ ” de uma cadeia de entrada  $\omega$ . Por notação funcional:  $U(\text{“}M\text{” “}\omega\text{”}) = \text{“}M(\omega)\text{”}$ .

A partir da máquina  $U$  de uma fita, será descrita uma máquina  $U'$  com três fitas, onde a primeira contém a codificação do conteúdo da fita de  $M$ , a segunda a codificação da própria máquina  $M$  e a terceira fita a codificação do estado de  $M$  no ponto corrente da computação.

A máquina  $U'$  é iniciado com alguma cadeia “ $M$ ” “ $\omega$ ” em sua primeira fila, estando as outras preenchidas com espaços em branco.  $U'$  move “ $M$ ” para a segunda fita e desloca “ $\omega$ ” para a esquerda deixando a primeira fita com “ $\triangleright \sqcup \omega$ ”. Então  $U'$  grava na terceira fita a codificação do estado inicial de  $M$  que é sempre  $q0^i$ . Agora  $U'$  passa a simular a computação de  $M$ . Entre os passos da computação simulada,  $U'$  manterá os cabeçotes da segunda e terceira fitas em suas extremidades esquerdas enquanto o cabeçote da primeira fita posiciona-se sobre o símbolo  $a$  associado à versão codificada do símbolo que  $M$  estaria lendo no momento.

$U$  simula então um passo da operação de  $M$ : percorre sua segunda fita buscando uma quadrupla em que o primeiro componente corresponda ao estado codificado gravado na primeira fita, e o segundo componente ao símbolo codificado apontado na primeira fita. Localizando a quadrupla,  $U'$  altera o estado corrente da terceira fita substituindo pelo terceiro componente desta quadrupla e realiza na primeira fita a ação especificada pelo quarto componente. Se em algum passo a combinação estado-símbolo não for encontrada na segunda fita, significa que o estado corrente é um estado de parada e isso completa a descrição da computação de  $U'$ .

### **3. Livro: Introdução à Teoria de Autômatos, Linguagens e Computação**

*(John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman e Rajeev Motwani)*

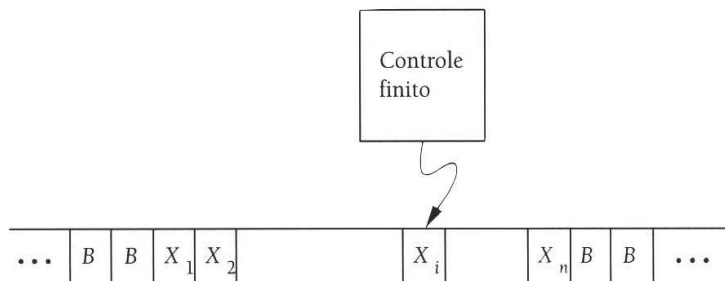
#### **3.1. Máquina de Turing**

Em 1936, A. M. Turing propôs a máquina de Turing como um modelo de “qualquer computação possível”. Este modelo é semelhante ao computador e não ao programa e embora os computadores eletrônicos estivessem muito longe de serem construídos. A máquina de Turing é essencialmente um autômato finito que tem uma única fita de comprimento infinito na qual ele pode ler e gravar dados.

##### **3.1.1. Notação para a máquina de Turing**

A máquina de Turing consiste em um controle finito, que pode se encontrar em qualquer estado de um conjunto finito de estados. Existe uma fita dividida em quadrados ou células

em que cada célula pode conter qualquer símbolo de um número finito de símbolos (ver Figura 4).



**Figure 4.** MÁQUINA DE TURING

Uma string finita escolhida a partir do alfabeto de entrada é colocada inicialmente na fita. Todo restante da fita, do infinito a esquerda ao infinito a direita contém o símbolo branco. Existe uma cabeça da fita que fica sempre posicionada em uma das células da fita, e inicialmente a cabeça da fita fica na célula mais a esquerda que contém a entrada.

Um movimento da máquina de Turing é uma função do estado de controle finito e do símbolo da fita. Em um movimento a máquina de Turing:

1. Muda de estado.
2. Grava um símbolo na célula varrida. O símbolo pode ser o mesmo que ocupar a célula no momento.
3. Movimenta a cabeça da fita para a esquerda ou para a direita. Não é permitido que a cabeça permaneça estacionária.

A notação para a máquina de Turing (TM) se dá pela tupla de 7 valores:

$$M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, B, F)$$

Sendo:

- $Q$ : O conjunto finito de estados do controle finito.
- $\Sigma$ : O conjunto finito dos símbolos de entrada.
- $\Gamma$ : O conjunto dos símbolos da fita, sendo que  $\Sigma$  é sempre um subconjunto de  $\Gamma$ .
- $\delta$ : A função de transição. Os argumentos de  $\delta(q, X)$  são um dado  $q$  e um símbolo de fita  $X$ . O valor de  $\delta(q, X)$ , se ele for definido é uma tripla  $(p, Y, D)$ , onde:
  1.  $p$  é o próximo estado de  $Q$ .
  2.  $Y$  é o símbolo em  $\Gamma$  gravado na célula corrente.
  3.  $D$  é uma direção ou sentido, sendo  $L$  o movimento da cabeça para a esquerda e  $R$  o movimento da cabeça para a direita.
- $q_0$ : O estado inicial. Sendo que  $q_0$  está em  $Q$ .
- $B$ : O Símbolo branco. Sendo que  $B$  está em  $\Gamma$ , mas  $B$  não está em  $\Sigma$ , isto é, ele é um símbolo da fita mas não é um símbolo de entrada. Todos os símbolos da fita, exceto os de entrada, são símbolos branco.
- $F$ : O conjunto de estados finais, um subconjunto de  $Q$ .

### 3.1.2. Descrições instantâneas para máquina de Turing

Toda TM tem em princípio uma fita infinitamente longa, mas após um número finito de movimentos, apenas um número finito de células pode ser visitada. Assim só será mostrada em uma Descrição instantânea (ID), as células que estão entre os não brancos mais a esquerda e mais a direita. No caso da cabeça estar varrendo um dos não brancos de uma das extremidades, um número finito de brancos à esquerda ou a direita da parte da fita sem brancos deve ser incluídos na ID.

Além da fita devemos também incorporar o controle finito e o cabeçote da fita. Para isto, o estado será colocado imediatamente a esquerda da célula varrida. Entretanto não podemos usar para representar o estado nenhum símbolo que também seja um símbolo de fita. Deste modo usaremos o string  $X_1X_2\dots X_{i-1}qX_iX_{i+1}\dots X_n$  para representar uma ID, em que:

1.  $q$  é o estado da TM.
2. A cabeça da fita está varrendo o  $i$ -ésimo símbolo.
3.  $X_1X_2\dots X_n$  é a parte da fita entre o não branco mais a esquerda e o não branco mais a direita.

O movimento da máquina de Turing  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, B, F)$  será representada pelo símbolo  $\vdash_M$ , e quando  $M$  for subentendido, será usado apenas  $\vdash$ .

Supondo que  $\delta(q, X_i) = (p, Y, L)$ , isto é, o próximo deslocamento é para esquerda e  $Y$  é gravado na posição corrente da fita. Então:

$$X_1X_2\dots X_{i-1}qX_iX_{i+1}\dots X_n \vdash X_1X_2\dots X_{i-2}pX_{i-1}YX_{i+1}\dots X_n$$

### 3.1.3. Diagramas de Transição

Consiste de um conjunto de nós correspondentes aos estados da TM e arcos, na qual um arco que vai do estado  $q$  ao estado  $p$  é rotulado por um ou mais ítems da forma  $X/YD$ , em que  $X$  e  $Y$  são símbolos da fita e  $D$  é um sentido  $L$  ou  $R$ . O deslocamento para direita  $R$  será representado por  $\rightarrow$  e o deslocamento para esquerda  $L$  por  $\leftarrow$ . O estado inicial será marcado pela palavra *início* com uma seta que entra neste estado. Os estados de aceitação são indicados por círculos duplos (ver figura 5) [Hopcroft 2001].

## 3.2. Máquina de Turing universal

A máquina de Turing pode ser usada como um “computador de programa armazenado”, recebendo seu programa e também seus dados de uma ou mais fitas em que a entrada é colocada. Esta máquina é conhecida como máquina de Turing universal (TMU).

É possível codificar de forma binária um máquina de Turing. Para representar a TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_1, B, F)$  como uma string binária, inicialmente vamos definir inteiros para representar os estados, símbolos e direções,  $L$  e  $R$ .

- Vamos assumir que os estados são  $q_1, q_2, \dots, q_r$ . Sendo  $q_1$  e  $q_2$  somente estados de aceitação.
- Os possíveis símbolos são  $X_1, X_2, \dots, X_s$ . Sendo que  $X_1$  sempre será 0,  $X_2$  sempre será 1 e  $X_3$  sempre será  $B$ . Os demais símbolos podem ser escolhidos arbitrariamente dentre o restante dos símbolos possíveis.



- Para a direção assumiremos  $L$  como  $D_1$  e  $R$  como  $D_2$ .

Agora vamos codificar a função de transição  $\delta$ . Supondo  $\delta(q_i, X_j) = (q_k, X_l, D_m)$ , sendo que  $i, j, k, l$  e  $m$  são inteiros, a codificação em um string binário do tipo  $0^i 10^j 10^k 10^l 10^m$ . Note que para qualquer valor de  $i, j, k, l$  e  $m$  não existe a possibilidade de uma ocorrência de dois valores consecutivos de 1's. A codificação de uma TM  $M$  consiste de todos os códigos em ordem separados por pares de 1's consecutivos, como:  $C_1 11 C_2 11 \dots C_{n-1} 11 C_n$ , em que cada  $C$  é o código de uma transição de  $M$ .

### Exemplo:

Sendo  $M$ :

$$M = (\{q_1, q_2, q_3\}, \{0, 1\}, \{0, 1, B\}, \delta, q_1, B, \{q_2\})$$

Onde  $\delta$  consiste de:

$$\begin{aligned} \delta(q_1, 1) &= (q_3, 0, R) \\ \delta(q_3, 0) &= (q_1, 1, R) \\ \delta(q_3, 1) &= (q_2, 0, R) \\ \delta(q_3, B) &= (q_3, 1, L) \end{aligned}$$

A codificação de  $\delta$  fica;

```
0100100010100
0001010100100
00010010010100
0001000100010010
```

A codificação de  $M$  fica:

```
01001000101001100010101001001100010010010100110001000100010010
```

A linguagem universal  $L_u$  é um conjunto de strings binários que codificam um par  $(M, w)$ , onde  $M$  é uma TM com o alfabeto de entrada binário e  $w$  é uma string em  $(0 + 1)^*$ , tal que  $w$  pertence a  $L(M)$ .

A máquina de Turing universal  $U$  é uma máquina de várias fitas (ver Figura 6). Na primeira fita vão as as transições de  $M$ , e o string  $w$ . Na segunda fita grada-se a fita simulada de  $M$ , usando o mesmo formato utilizado no código de  $M$ . Isto é, o símbolo de fita  $X_i$  de  $M$  será representado por  $0^i$  e os símbolos de fita serão separados por 1's isolados. A terceira fita contém o estado de  $M$ , com o estado  $q_i$  representado por  $i0's$ .

### 3.3. Operação da máquina de Turing universal

A operação da TMU  $U$  pode ser resumida da seguinte forma:

1. Verifica o código de  $M$  entrada analisando se corresponde a uma TM válida. Se não for, pára.
2. Inicializa da fita com a forma codificada da entrada  $w$ .
3. Insere 0, o estado inicial de  $M$ , na terceira fita e move a cabeça da segunda fita para a primeira célula simulada.
4. Simula o movimento de  $M$  procurando em sua primeira fita por uma transição  $0^i 10^j 10^k 10^l 10^m$ , tal que  $0^i$  seja o estado na fita 3 e  $0^j$  o símbolo na fita de  $M$  que começa na posição da fita 2 varrida por  $U$ .  $U$  deve:

- (a) Mudar o conteúdo da fita 3 para  $0^k$ .
  - (b) Substitui  $0^j$  na fita 2 por  $0^l$ .
  - (c) Move a cabeça na fita 2 de acordo com o valor de  $m$ . Se  $m = 1$ , move para o próximo 1 a esquerda, mas se  $m = 2$ , move para o próximo 1 a direita.
5. Se  $M$  não tem nenhuma transição que corresponda ao estado simulado e ao símbolo de fita, então a máquina pára.
  6. Se  $M$  entrar em seu estado de aceitação, então  $U$  aceita.

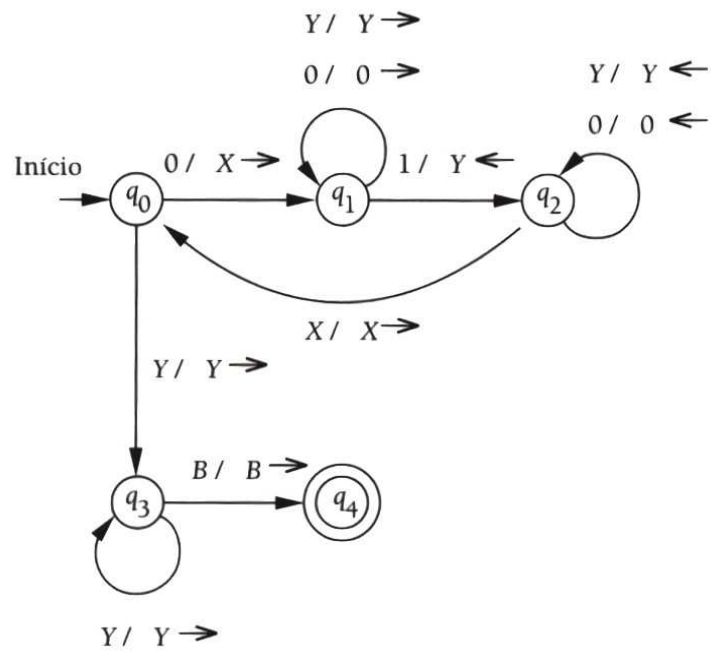
Desta maneira  $U$  simula  $M$  sobre  $w$ .  $U$  aceita o par codificado  $(M, w)$  se e somente se  $M$  aceita  $w$ . [Hopcroft 2001]

#### **4. Considerações finais**

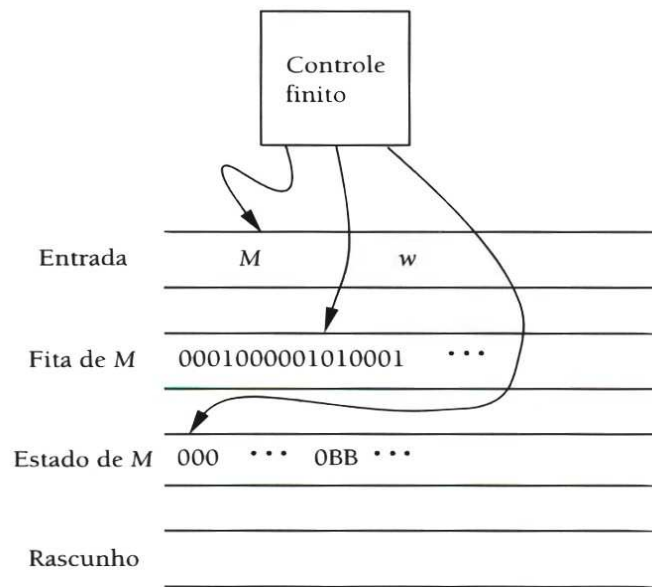
As duas bibliografias utilizam formas bem diferentes de abordar os temas assim como difere também a simbologia utilizada. Mas embora as abordagens sejam distintas, nenhuma se mostra melhor ou pior, é apenas uma questão de opção por parte de cada autor.

#### **References**

- Hopcroft, J. E. (2001). *Introdução à Teoria de Autômatos, Linguagens e Computação*. Campus.
- Lewis, H. R. (2000). *Elementos de Teoria da Computação*. Bookman.



**Figure 5.** DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE UMA TM



**Figure 6.** MÁQUINA DE TURING UNIVERSAL