

# O MODELO DE COMPUTAÇÃO REVERSÍVEL DE **BENNETT**



Guilherme Meneghetti Einloft, Jaime Antonio  
Daniel Filho e Luís Gustavo Werle Tozevich



**E se pudéssemos computar sem haver dissipação de energia, voltando no tempo para desfazer cada operação?**





**COMPUTADORES  
TRADICIONAIS SÃO  
LOGICAMENTE  
IRREVERSÍVEIS**

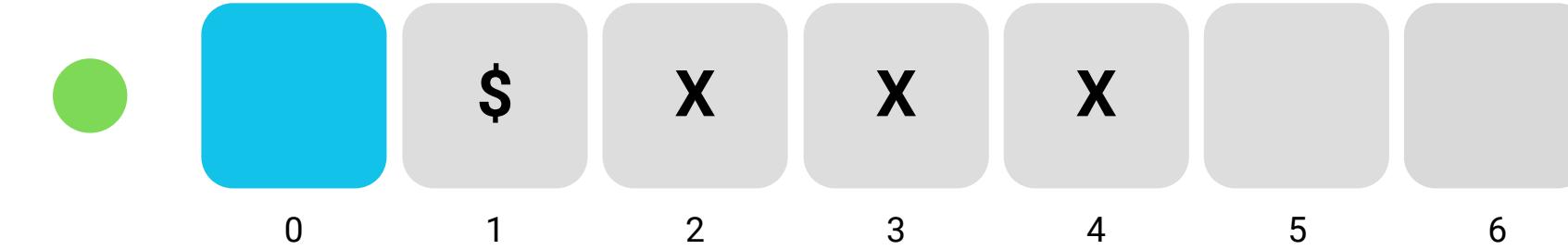
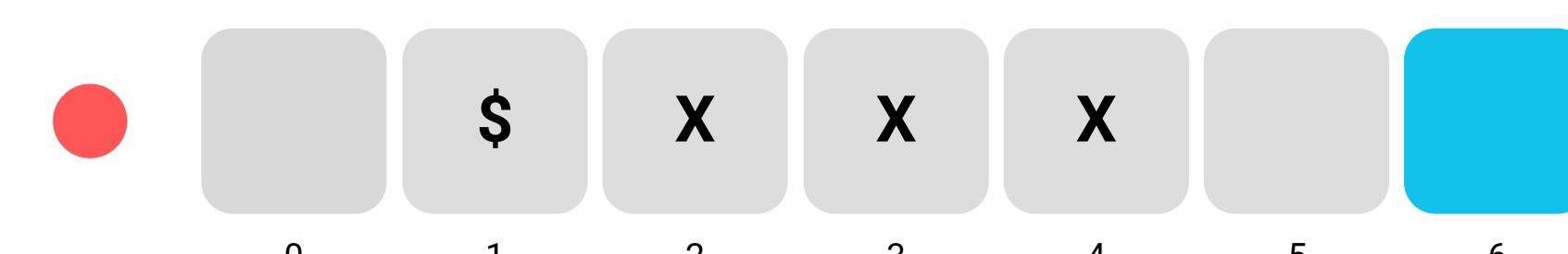
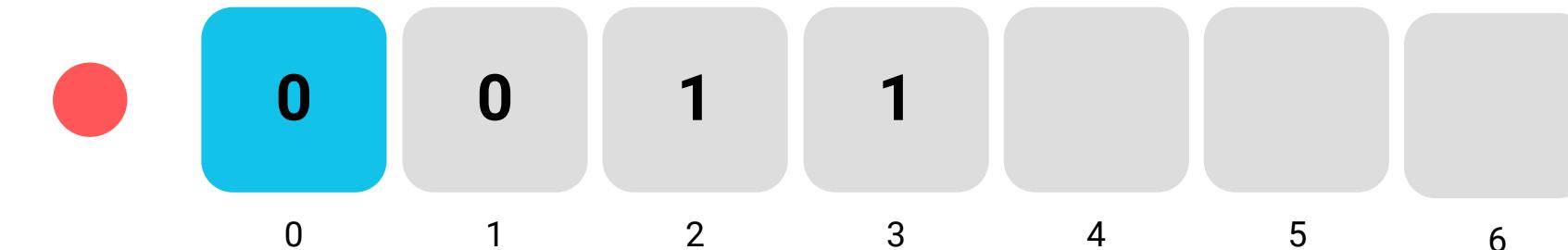
**A PERDA DE INFORMAÇÃO  
GERA DISSIPAÇÃO  
MÍNIMA DE ENERGIA (LEI  
DE LANDAUER)**

**COMPUTAÇÃO REVERSÍVEL  
PROPÕE COMPUTAR SEM  
PERDER INFORMAÇÃO E  
REDUZIR DISSIPAÇÃO**

# Definição: entrada e saída padrão

>>>

- Está em uma fita **totalmente em branco**, exceto pela própria entrada ou saída.
- Não contém espaços em **branco embutidos** na cadeia de símbolos.
- A cabeça de leitura/gravação está **posicionada sobre o quadrado em branco imediatamente à esquerda**.
- Contém **apenas símbolos do alfabeto** da fita da máquina que a está processando.



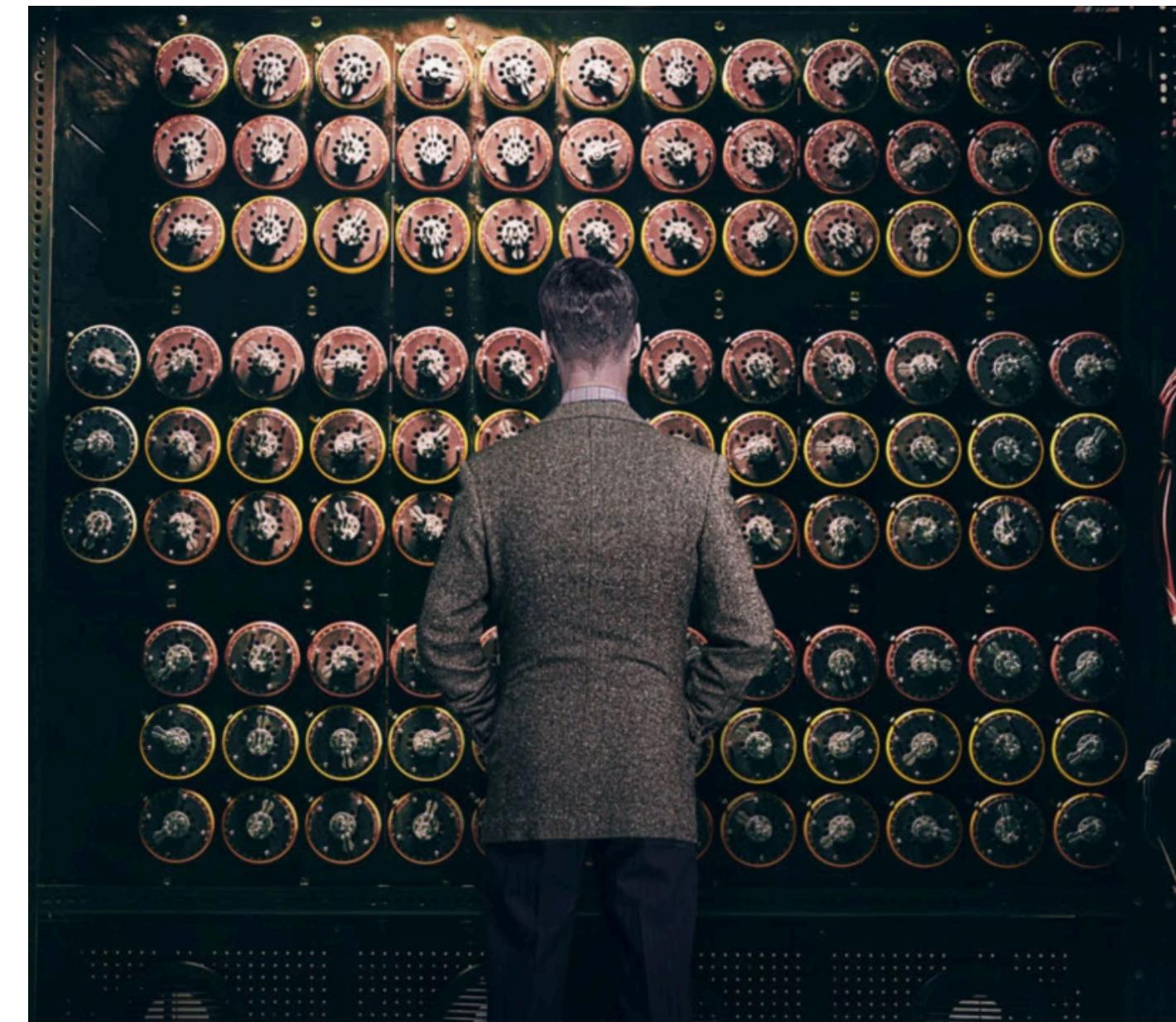
# Definição: Máquina de Turing padrão

>>>

Uma máquina de Turing padrão é um conjunto finito de quíntuplas de uma única fita  $AT \rightarrow T' \sigma A'$  que satisfaz os seguintes requisitos:

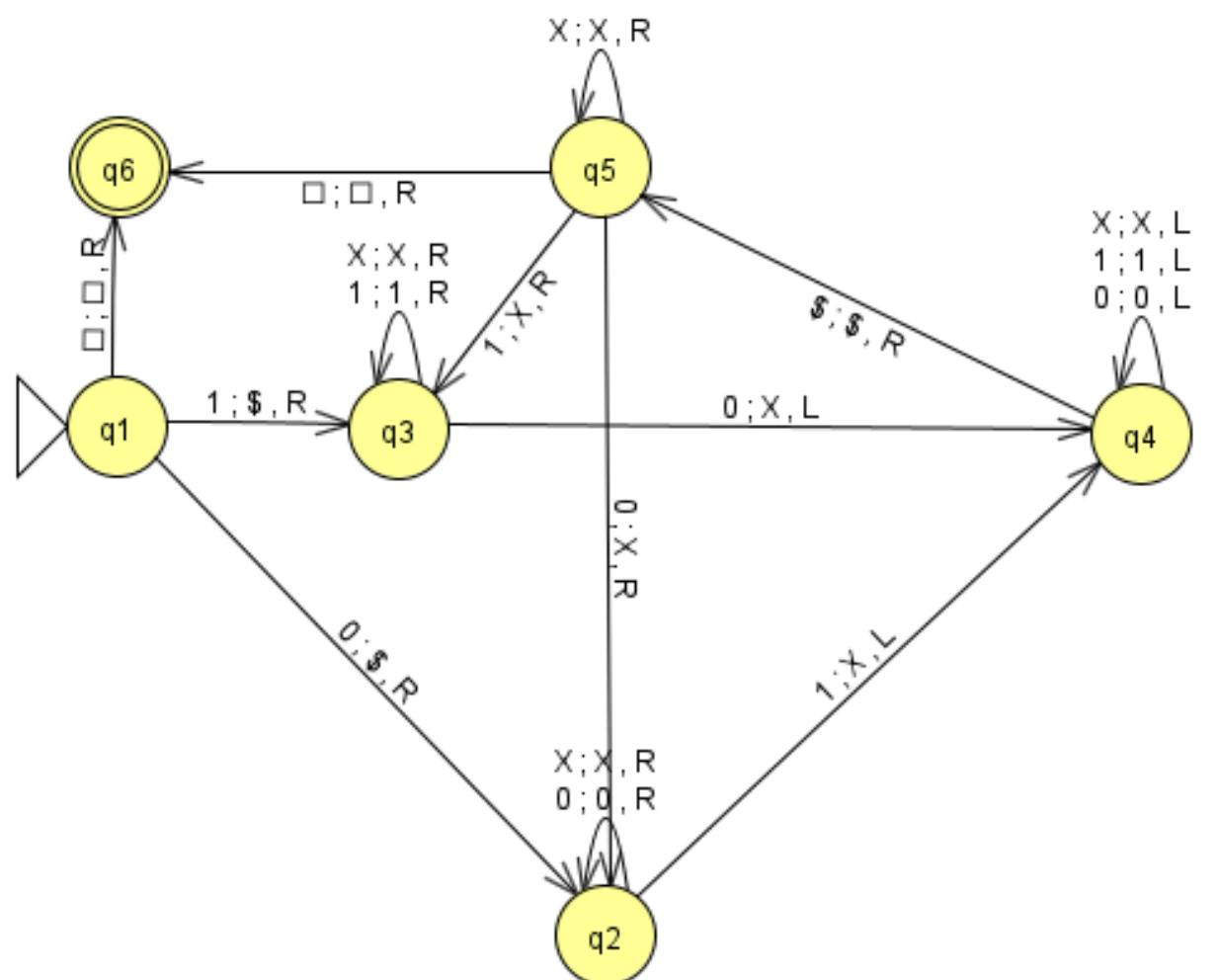
- **Determinismo:** Nenhuma duas quíntuplas coincidem tanto em  $A$  quanto em  $T$ .
- **Formato:** Se iniciada no estado de controle  $A_1$  com qualquer **entrada padrão**, a máquina, se parar, irá parar no estado de controle  $A_f$  ( $f$  sendo o número de estados de controle), deixando sua **saída em formato padrão**.
- **Quíntuplas especiais:** A máquina inclui as seguintes quíntuplas:
  - $A_1 B \rightarrow B + A_2$
  - $A_{f-1} B \rightarrow B 0 A_f$

Os estados de controle  $A_1$  e  $A_f$  não aparecem em nenhuma outra quíntupla. Esses dois são, assim, respectivamente **o primeiro** e **o último** executados **em qualquer computação** que termine com uma entrada padrão. A letra  $B$  representa um espaço em branco.



# Máquina de Turing Original

>>>



## Entrada fora do "padrão"

A máquina dada esperava iniciar na **posição do primeiro símbolo** de entrada. Entretanto, o artigo requer que o cabeçote da máquina inicie na **posição em branco que precede imediatamente a entrada**.

## Saída fora do "padrão"

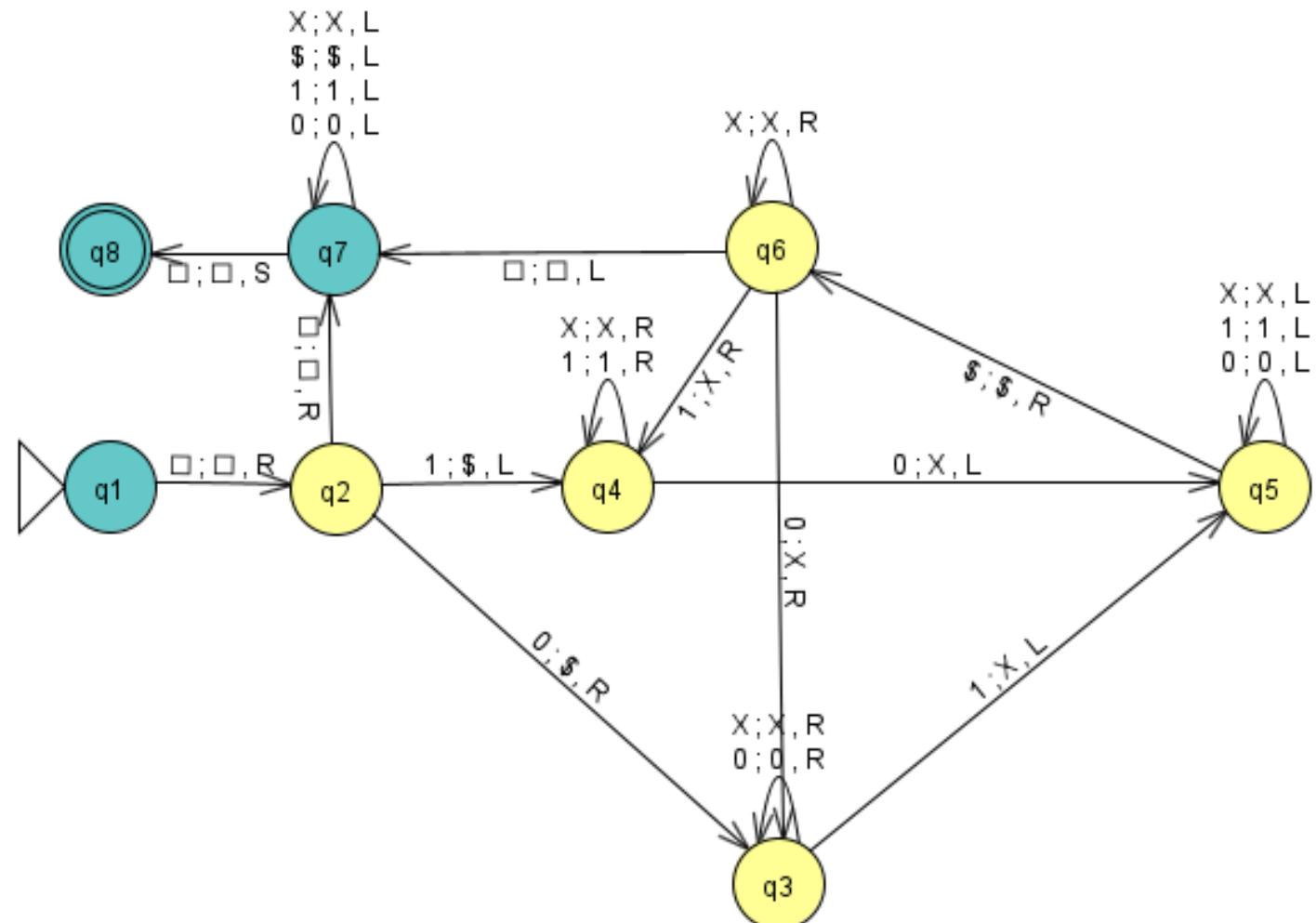
Ao chegar no estado final, o cabeçote da máquina encontrava-se na **posição após a entrada** ao invés da **posição inicial da máquina**.

## Transições obrigatórias ausentes

O artigo exige as transições  $A_1 B \rightarrow B + A_2$  e  $A_5 B \rightarrow B 0 A_6$ . A primeira serve para mover o cabeçote para o início da entrada, ao passo que a segunda, define um estado livre para construímos a máquina reversível.

# Máquina de Turing Padronizada

>>>



## Novo estado 1

Possibilita que o cabeçote da máquina **inicie na posição que precede a entrada** e que exista a transição  $A_1 B \rightarrow B + A_2$ .

## Novo estado 7

Substitui o estado original final, **movendo para a esquerda** ao encontrar qualquer símbolo **até chegar na posição de início**.

## Novo estado 8

Possibilita a transição  $A_7 B \rightarrow B 0 A_8$ .

# Quintúplas para quadruplas

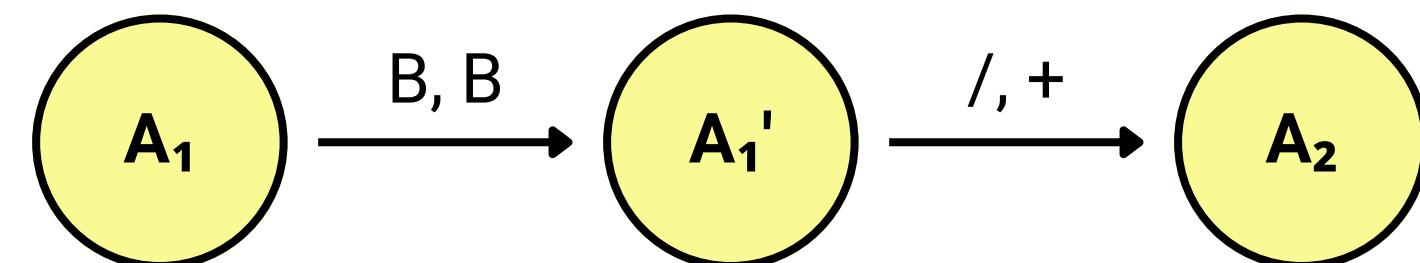
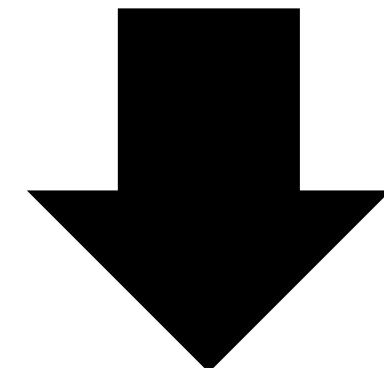
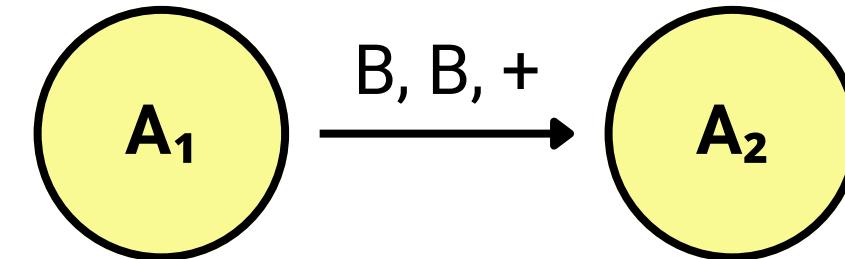
>>>

## Quíntuplas

$AT \rightarrow T' \sigma A'$ :

Se o estado é **A** e o símbolo lido é **T**, faça:

1. Escreve **T'**.
2. Mova na direção  $\sigma$  (-, + ou 0).
3. Vá para o estado **A'**.



## Quadrúplas

(Leitura + Escrita)  $AT \rightarrow T'A'$ :

Se o estado é **A** e o símbolo lido é **T**, faça:

1. Escreve **T'**.
2. Vá para o estado **A'**.

(Deslocamento)  $A/ \rightarrow \sigma A'$ :

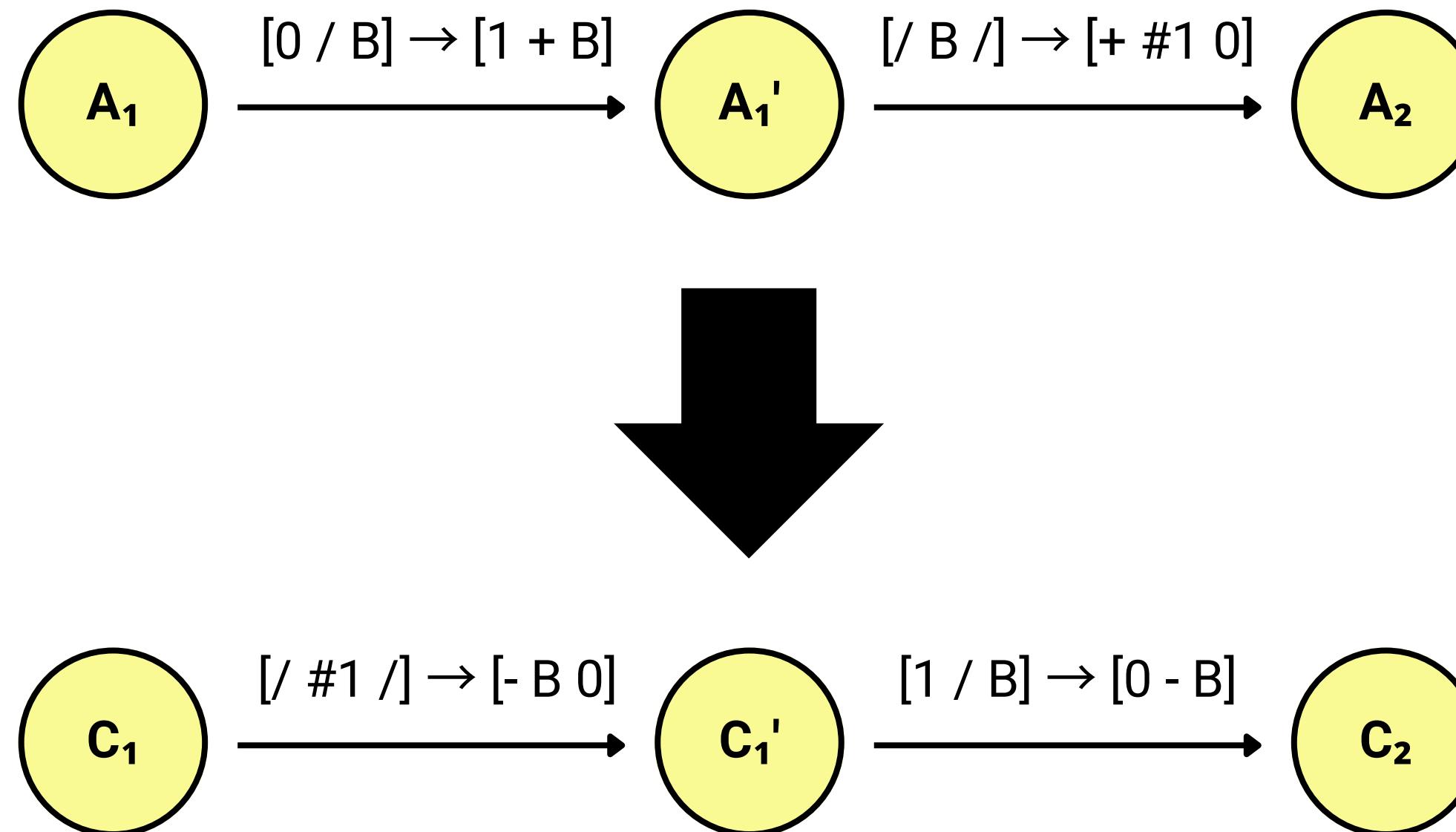
Se o estado é **A**, faça:

1. Mova na direção  $\sigma$  (-, + ou 0).
2. Vá para o estado **A'**.



# Princípio da reversibilidade

>>>



# Simulação



>>>

# Hora do código



# DÚVIDAS?

# INVERSÃO DA QUÁDRUPLA

1. Trocar estados inicial e final:
2.  $A \leftrightarrow A'$
3. Trocar símbolo lido e escrito:
4. Para cada fita:
  - Se havia leitura/escrita ( $t_k \neq /$ ), troca  $t_k \leftrightarrow t_k'$ .
  - Se era movimento ( $t_k = /$ ), inverte o sentido do movimento:
    - "+" vira "-"
    - "-" vira "+"
    - "O" continua "O" (não muda)

$$A [0 / /] \rightarrow [1 / /] A' \quad \longrightarrow \quad A' [1 / /] \rightarrow [0 / /] A$$

# Quíntuplas a Quádruplas

01

## Quíntuplas

$A, T \rightarrow T', d, A'$

Significado:

Se o estado é  $A$  e o símbolo lido é  $T$ ,

- escreva  $T'$ ,
- move o cabeçote na direção  $d$  ( $\leftarrow$ ,  $\rightarrow$  ou  $\cdot$ ),
- vá para o estado  $A'$ .

02

## Quádruplas

1. Primeira quádrupla (leitura + escrita):

- a. Ex:  $A [T / /] \rightarrow [T' / /] A''$
- b. (Lê  $T$ , escreve  $T'$ , não move)

2. Segunda quádrupla (movimento):

- a. Ex:  $A'' [/ / /] \rightarrow [d / /] A'$
- b. (Não lê nada, apenas move o cabeçote e troca o estado)

Para cada quíntupla, cria-se um estado intermediário único  $A''$ , garantindo que a reversão seja determinística.