

# Técnicas de Busca e Ordenação (TBO)

## **Radix Sort**

Departamento de Informática (DI)  
Centro Tecnológico (CT)  
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

(Material baseado nos slides dos Professores Eduardo Zambon e Giovanni Comarela)

# Introdução

- Até agora: abstrair os itens a serem ordenados com a definição de uma **chave** de ordenação e fazer **comparação de chaves**.
- Outro método: algoritmos de ordenação por radicais (*radix sorting*) trabalham diretamente com os “**dígitos**” das chaves, comparando-as **em partes**.
- **Aula de hoje:** apresentação das diferentes implementações de *radix* e dos algoritmos de ordenação ***radix sort***.
- **Objetivos:** compreender as aplicações e o funcionamento do método de ordenação ***radix sort***.

## Referências

### Chapter 10 – Radix Sorting

*R. Sedgewick*

# *Strings* e Alfabetos

# Tipo de dado `char`

## Tipo de dado `char` em C:

- Tipicamente é um inteiro de 8 bits.
- Suporta a codificação **ASCII** de 7 bits.
- Pode representar no **máximo 256** caracteres.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	NUL	SOH	STX	ETX	EOT	ENQ	ACK	BEL	BS	HT	LF	VT	FF	CR	SO	SI
1	DLE	DC1	DC2	DC3	DC4	NAK	SYN	ETB	CAN	EM	SUB	ESC	FS	GS	RS	US
2	SP	!	"	#	\$	%	&	'	(	)	*	+	,	-	.	/
3	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>	?
4	@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
5	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[	\	]	^	_
6	`	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
7	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{		}	~	DEL

Hexadecimal to ASCII conversion table

**Em Java:** suporta Unicode 16 de bits.

# Strings em C

## Tipo de dado `string` em C:

- Linguagem não possui um tipo *string* **explícito**.
- Representado por um `char*`.
- Como *arrays* em C não carregam o seu próprio tamanho, *strings* são terminadas pelo caractere `'\0'`.
- Maior parte das operações implementadas em `string.h`.

*Strings* em C são **mutáveis**  $\Rightarrow$  Cuidado ao usar como **chaves**!

Manipulação de *strings* em C é **muito propensa a erros**.

**Exemplo:**

```
int main() {  
    char *s = "abc";  
    s[0] = 'd'; // 'a' to 'd'  
    // Segmentation fault... --  
}
```

# Novo tipo de dado *String*

Novo tipo *String* para evitar o inferno astral de ter de lidar com *array* de `char` terminado por `'\0'`.

```
typedef struct {  
    char *c;  
    int len;  
} String;
```

## Vantagens:

- Pode ajudar na *imutabilidade* tornando a estrutura *opaca*.
- Obter o tamanho de uma *string* agora é *constante*.
- Elimina erros como do slide anterior já que todas as *strings* são *alocadas no heap*.

# Novo tipo de dado *String*: operações

**Comparar** duas *strings* a partir do caractere na **posição *d***.

```
int compare_from(String *s, String *t, int d) {  
    int min = s->len < t->len ? s->len : t->len;  
    for (int i = d; i < min; i++) {  
        if (s->c[i] < t->c[i]) { return -1; }  
        if (s->c[i] > t->c[i]) { return 1; }  
    }  
    return s->len - t->len;  
}
```

**Retorna:**

- **-1**: se  $s < t$ .
- **1**: se  $s > t$ .
- **0**: se  $s = t$ .

**Atenção:**

- Se  $s$  é **prefixo** de  $t$ , retorna  $< 0$ .
- **Exemplo**:  $she < shells$ .

# Novo tipo de dado *String*: operações

Demais operações são **triviais** de implementar a partir de `compare_from`.

```
int compare(String *s, String *t) {  
    return compare_from(s, t, 0);  
}
```

Interface usual de **Item** também fica simples.

```
typedef String* Item;  
  
#define less(A, B) (compare(A, B) < 0)  
#define less_from(A, B, d) (compare_from(A, B, d) < 0)  
#define exch(A, B) { Item t = A; A = B; B = t; }
```



# Comparando duas *strings*

**Q:** Quantas comparações de caracteres são necessárias para comparar **duas strings** de **comprimento  $W$** ?

p	r	e	f	e	t	c	h
0	1	2	3	4	5	6	7
p	r	e	f	i	x	e	s

**Tempo de execução:** Proporcional ao comprimento do **maior prefixo em comum**.

- Proporcional a  $W$  no **pior caso**.
- Mas geralmente é **sublinear** em relação a  $W$ .

# Alfabetos

**String:** Sequência de **símbolos** (caracteres, dígitos) sobre um alfabeto fixo.

**Radix:** Número  **$R$**  de **símbolos** de um alfabeto (tamanho).

name	R()	lgR()	characters
BINARY	2	1	01
OCTAL	8	3	01234567
DECIMAL	10	4	0123456789
HEXADECIMAL	16	4	0123456789ABCDEF
DNA	4	2	ACTG
LOWERCASE	26	5	abcdefghijklmnopqrstuvwxyz
UPPERCASE	26	5	ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
PROTEIN	20	5	ACDEFGHIKLMNPQRSTVWY
BASE64	64	6	ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZabcdefghijklmnopqrstuvwxyz0123456789+/-
ASCII	128	7	<i>ASCII characters</i>
EXTENDED_ASCII	256	8	<i>extended ASCII characters</i>
UNICODE16	65536	16	<i>Unicode characters</i>

# Contagem Indexada por Chaves

# Sumário: desempenho dos algoritmos de ordenação

Quantidade de operações feita por cada algoritmo.

algorithm	guarantee	random	extra space	stable?
insertion sort	$\frac{1}{2} N^2$	$\frac{1}{4} N^2$	1	✓
mergesort	$N \lg N$	$N \lg N$	$N$	✓
quicksort	$1.39 N \lg N^*$	$1.39 N \lg N$	$c \lg N$	
heapsort	$3 N \lg N$	$3 N \lg N$	1	

\* probabilistic

**Limite inferior:** pelo menos  $\sim N \lg N$  comparações.

- **Q:** É possível fazer melhor? (Apesar do limite inferior.)
- **A:** Sim, evitando **comparação de chaves**.
- **Comparação de chaves:** decisões **binárias**.
- **Comparação por radix  $R$ :** decisões têm  $R$  resultados.

# Key-indexed counting: suposições sobre as chaves

**Suposição:** chaves são **inteiros** entre  $0$  e  $R - 1$ .

**Implicação:** podemos usar as chaves como **índices** de *array*.

**Aplicações:**

- Ordenar uma *string* pela primeira letra.
- Ordenar empregados por seção.
- Ordenar números de telefone por código de área.
- Sub-rotina em um algoritmo de ordenação (em breve).

input		sorted result	
name	section	(by section)	
Anderson	2	Harris	1
Brown	3	Martin	1
Davis	3	Moore	1
Garcia	4	Anderson	2
Harris	1	Martinez	2
Jackson	3	Miller	2
Johnson	4	Robinson	2
Jones	3	White	2
Martin	1	Brown	3
Martinez	2	Davis	3
Miller	2	Jackson	3
Moore	1	Jones	3
Robinson	2	Taylor	3
Smith	4	Williams	3
Taylor	3	Garcia	4
Thomas	4	Johnson	4
Thompson	4	Smith	4
White	2	Thomas	4
Williams	3	Thompson	4
Wilson	4	Wilson	4

↑  
keys are  
small integers

# Key-indexed counting: implementação e exemplo

**Objetivo:** ordenar um *array*  $a[]$  de  $N$  inteiros entre 0 e  $R - 1$ .

- Vetor auxiliar 1:  $count[]$  de tamanho  $R + 1$ .
- Vetor auxiliar 2:  $aux[]$  de tamanho  $N$ .
- No exemplo abaixo:  $R = 6$ .

```
for (int i = 0; i < N; i++)
    count[a[i]+1]++;

for (int r = 0; r < R; r++)
    count[r+1] += count[r];

for (int i = 0; i < N; i++)
    aux[count[a[i]]++] = a[i];

for (int i = 0; i < N; i++)
    a[i] = aux[i];
```

i	a[i]
0	d
1	a
2	c
3	f
4	f
5	b
6	d
7	b
8	f
9	b
10	e
11	a

use a for 0  
b for 1  
c for 2  
d for 3  
e for 4  
f for 5

# Key-indexed counting: implementação e exemplo

**Objetivo:** ordenar um *array*  $a[]$  de  $N$  inteiros entre 0 e  $R - 1$ .

■ **P.1:** Contar a frequência de cada valor usando  $count[]$ .

count frequencies →

```
for (int i = 0; i < N; i++)  
    count[a[i]+1]++;  
  
for (int r = 0; r < R; r++)  
    count[r+1] += count[r];  
  
for (int i = 0; i < N; i++)  
    aux[count[a[i]]++] = a[i];  
  
for (int i = 0; i < N; i++)  
    a[i] = aux[i];
```

i	a[i]
0	d
1	a
2	c
3	f
4	f
5	b
6	d
7	b
8	f
9	b
10	e
11	a

offset by 1  
[stay tuned]

↓

r count[r]

a	0
b	2
c	3
d	1
e	2
f	1
-	3

# Key-indexed counting: implementação e exemplo

**Objetivo:** ordenar um *array*  $a[]$  de  $N$  inteiros entre 0 e  $R - 1$ .

■ **P.2:** Computar a frequência **acumulada**.

compute  
cumulates

```
for (int i = 0; i < N; i++)  
    count[a[i]+1]++;
```

```
for (int r = 0; r < R; r++)  
    count[r+1] += count[r];
```

```
for (int i = 0; i < N; i++)  
    aux[count[a[i]]++] = a[i];
```

```
for (int i = 0; i < N; i++)  
    a[i] = aux[i];
```

i	a[i]	r	count[r]
0	d		
1	a		
2	c		
3	f	a	0
4	f	b	2
5	b	c	5
6	d	d	6
7	b	e	8
8	f	f	9
9	b		12
10	e		
11	a		

6 keys < d, 8 keys < e  
so d's go in a[6] and a[7]



# Key-indexed counting: implementação e exemplo

**Objetivo:** ordenar um *array*  $a[]$  de  $N$  inteiros entre 0 e  $R - 1$ .

■ **P.3:** Mover os itens para um vetor **auxiliar**.

```
for (int i = 0; i < N; i++)
    count[a[i]+1]++;

for (int r = 0; r < R; r++)
    count[r+1] += count[r];

for (int i = 0; i < N; i++)
    aux[count[a[i]]++] = a[i];

for (int i = 0; i < N; i++)
    a[i] = aux[i];
```

move items →

i	a[i]	r	count[r]	i	aux[i]
0	d			0	a
1	a			1	a
2	c			2	b
3	f	a	2	3	b
4	f	b	5	4	b
5	b	c	6	5	c
6	d	d	8	6	d
7	b	e	9	7	d
8	f	f	12	8	e
9	b	-	12	9	f
10	e			10	f
11	a			11	f

# Key-indexed counting: implementação e exemplo

**Objetivo:** ordenar um *array*  $a[]$  de  $N$  inteiros entre 0 e  $R - 1$ .

■ **P.4:** Copiar de volta para o vetor original (se necessário).

```
for (int i = 0; i < N; i++)  
    count[a[i]+1]++;
```

```
for (int r = 0; r < R; r++)  
    count[r+1] += count[r];
```

```
for (int i = 0; i < N; i++)  
    aux[count[a[i]]++] = a[i];
```

copy  
back

```
for (int i = 0; i < N; i++)  
    a[i] = aux[i];
```

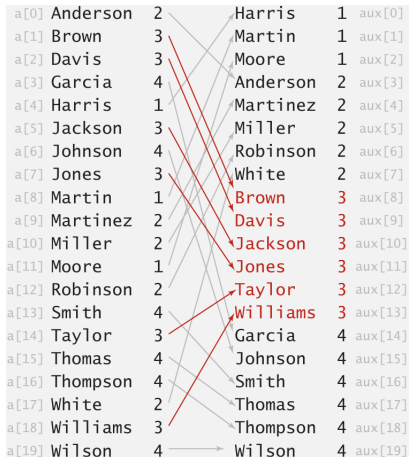
i	a[i]		i	aux[i]
0	a		0	a
1	a		1	a
2	b		2	b
3	b		3	b
4	b	a	4	b
5	c	b	5	c
6	d	c	6	d
7	d	d	7	d
8	e	e	8	e
9	f	f	9	f
10	f	-	10	f
11	f	-	11	f

r	count[r]
2	2
5	5
6	6
8	8
9	9
12	12
12	12

# Key-indexed counting: análise

- Tempo de execução é  $\sim 3N + R$ .
- Espaço extra é  $\sim N + R$ .
- Método é **estável**.



# Key-indexed counting: implementação em C

Versão final **generalizada** para uso em outros *sorts*:

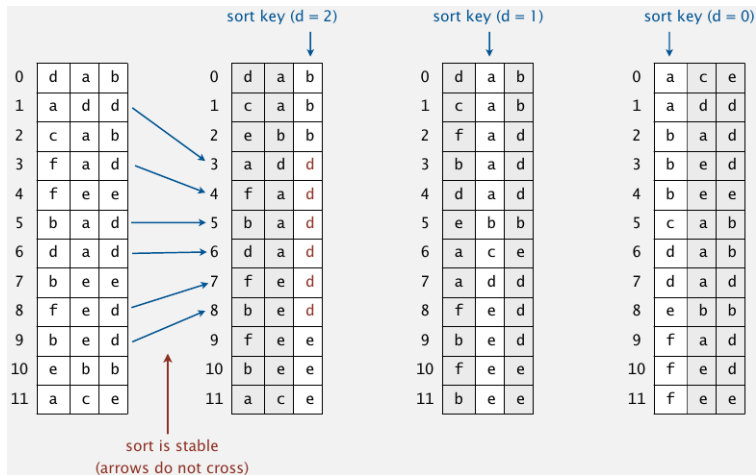
- Faz a **contagem** sobre o **d-ésimo** caractere.

```
void count_sort(String* *a, String* *aux, int *count,
                int lo, int hi, int d, int R) {
    clear_count_array(count, R);
    for (int i = lo; i <= hi; i++) { // Count frequencies.
        count[char_at(a[i], d) + 2]++;
    }
    for (int r = 0; r < R+1; r++) { // Compute cumulates.
        count[r+1] += count[r];
    }
    for (int i = lo; i <= hi; i++) { // Move items.
        int p = count[char_at(a[i], d) + 1]++;
        aux[p] = a[i];
    }
    for (int i = lo; i <= hi; i++) { // Copy back.
        a[i] = aux[i - lo];
    }
}
```

# *LSD Radix Sort*

# LSD (Least Significant Digit) radix sort

- Considera os caracteres da direita para a esquerda.
- Faz uma ordenação **estável** usando o **d-ésimo** caractere como chave (usa *key-indexed counting*).



# LSD radix sort: correção

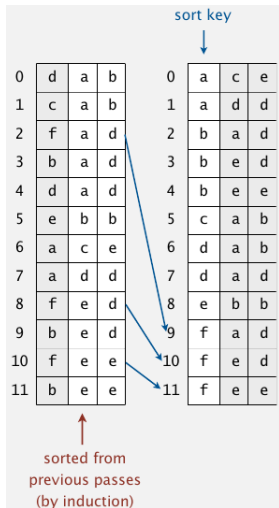
**Proposição:** LSD ordena *strings* de tamanho fixo de forma ascendente.

**Prova** (por indução em  $i$ ):

Depois da passada  $i$ , as *strings* estão ordenadas pelos **últimos  $i$**  caracteres.

- **Duas *strings* com chave de ordenação diferentes:** *key-indexed sort* as coloca na ordem relativa adequada.
- **Duas *strings* com chave de ordenação iguais:** estabilidade as mantém ordem relativa adequada.

LSD sort é **estável** porque *key-indexed sort* é estável.



# LSD radix sort: implementação em C

```
void sort(String* *a, int N) {  
    int W = 3; // Change accordingly to input size.  
    int R = 256;  
  
    String* *aux = create_str_array(N);  
    int* count = create_count_array(R);  
  
    for (int d = W-1; d >= 0; d--) {  
        count_sort(a, aux, count, 0, N-1, d, R);  
    }  
  
    free(count);  
    free(aux);  
}
```



# Sumário: desempenho dos algoritmos de ordenação

Quantidade de operações feita por cada algoritmo.

algorithm	guarantee	random	extra space	stable?
<b>insertion sort</b>	$\frac{1}{2} N^2$	$\frac{1}{4} N^2$	1	✓
<b>mergesort</b>	$N \lg N$	$N \lg N$	$N$	✓
<b>quicksort</b>	$1.39 N \lg N^*$	$1.39 N \lg N$	$c \lg N$	
<b>heapsort</b>	$3 N \lg N$	$3 N \lg N$	1	
<b>LSD sort</b> †	$W (3N + R)$	$W (3N + R)$	$N + R$	✓
† fixed-length W keys    * probabilistic				

**Q:** E se as *strings* não são todas do mesmo tamanho?



# Como ficar rico ordenando nos anos de 1900?

## Cartões perfurados (1900 a 1950):

- Também eram úteis para contabilidade, inventário e outros processos de negócios.
- Principal **mídia** para entrada, armazenamento e processamento de dados.

A empresa de Hollerith depois se fundiu com mais 3 outras para formar a **Computing Tabulating Recording Corporation (CTRC)**. Empresa foi renomeada em 1924.



IBM 80 Series Card Sorter (650 cards per minute)



# LSD radix sort: um momento na história (1960s)



card punch



punched cards



card reader



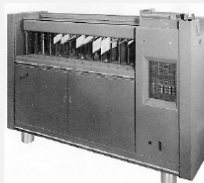
mainframe



line printer

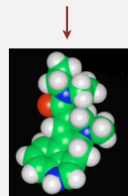
To sort a card deck

- start on right column
- put cards into hopper
- machine distributes into bins
- pick up cards (stable)
- move left one column
- continue until sorted



card sorter

not directly related  
to sorting

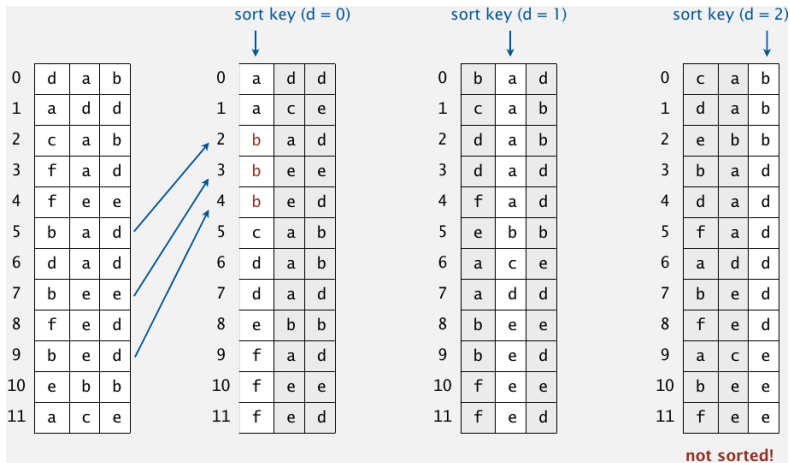


Lysergic Acid Diethylamide  
(Lucy in the Sky with Diamonds)

# *MSD Radix Sort*

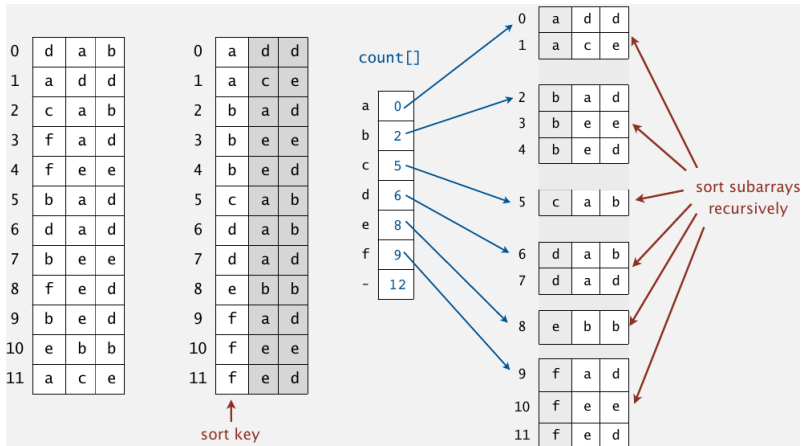
# LSD invertido

- Considera os caracteres da esquerda para a direita.
- Faz uma ordenação estável usando o  $d$ -ésimo caractere como chave (usa *key-indexed counting*).



# MSD (Most Significant Digit) radix sort

- Particiona o *array* em **R partes** segundo o primeiro caractere, usando *key-indexed counting*.
- Ordena **recursivamente** cada partição.



# MSD radix sort: exemplo

**input**

she	are	d	are	are	are	are	are	are
sells	by	to	by	by	by	by	by	by
seashells	she		sells	seashells	sea	sea	sea	sea
by	sells		seashells	sea	seashells	seashells	seashells	seashells
the	seashells		sea	seashells	seashells	seashells	seashells	seashells
sea	sea		sells	sells	sells	sells	sells	sells
shore	shore		seashells	sells	sells	sells	sells	sells
the	shells		she	she	she	she	she	she
shells	she		shore	shore	shore	shore	shore	shore
she	sells		shells	shells	shells	shells	shore	shells
sells	surely		she	she	she	she	she	she
are	seashells		surely	surely	surely	surely	surely	surely
surely	the	hi	the	the	the	the	the	the
seashells	the		the	the	the	the	the	the

*need to examine every character in equal keys*

*end of string goes before any char value*

are	are	are	are	are	are	are	<b>output</b>
by	by	by	by	by	by	by	are
sea	sea	sea	sea	sea	sea	sea	by
seashells	seashells	seashells	seashells	seashells	seashells	seashells	sea
seashells	seashells	seashells	seashells	seashells	seashells	seashells	seashells
sells	sells	sells	sells	sells	sells	sells	sells
sells	sells	sells	sells	sells	sells	sells	sells
she	she	she	she	she	she	she	she
shore	shore	shore	shells	she	she	she	she
shells	hells	shells	she	shells	shells	shells	shells
she	she	she	shore	shore	shore	shore	shore
surely	surely	surely	surely	surely	surely	surely	surely
the	the	the	the	the	the	the	the
the	the	the	the	the	the	the	the

Trace of recursive calls for MSD string sort (no cutoff for small subarrays, subarrays of size 0 and 1 omitted)



# Strings de tamanho variável

Considerar que as *strings* têm um caractere extra no final  
menor que todos os outros.

0	s	e	a	-1						
1	s	e	a	s	h	e	l	l	s	-1
2	s	e	l	l	s	-1				
3	s	h	e	-1						
4	s	h	e	-1						
5	s	h	e	l	l	s	-1			
6	s	h	o	r	e	-1				
7	s	u	r	e	l	y	-1			

she before shells

Implementação em C é bem simples.

```
#define char_at(S, D) ((D < S->len) ? S->c[D] : -1)
```

# MSD radix sort: implementação em C

Caractere “-1” fica na posição 1 de count.

```
for (int i = lo; i <= hi; i++) // Count frequencies.
    count[char_at(a[i], d) + 2]++;
```

Código abaixo reutiliza aux mas não count. Necessário porque chamadas recursivas **modificariam** o vetor count.

```
#define R 256
void rec_MSD(String* *a, String* *aux, int lo, int hi, int d) {
    if (hi <= lo) return;
    int* count = create_count_array(R);
    count_sort(a, aux, count, lo, hi, d, R); // Key-indexed count.
    for (int r = 1; r < R+1; r++) // Sort R arrays recursively.
        rec_MSD(a, aux, lo + count[r], lo + count[r+1] - 1, d+1);
    free(count);
}
void sort(String* *a, int N) {
    String* *aux = create_str_array(N);
    rec_MSD(a, aux, 0, N-1, 0);
    free(aux);
}
```

**Observação 1:** algoritmo **muito lento** para *sub-arrays* **pequenos**.

- Cada chamada de função precisa do seu próprio *array* `count`.
- Tabela ASCII: *array* tem tamanho 256.
- Unicode: *array* tem tamanho 65,536!
- Mesmo para ordenar um *sub-array* de tamanho 2 é necessário alocar o *array* `count` **todo**: não sabemos o conteúdo a ser ordenado.

**Observação 2:** temos um grande número de *sub-arrays* **pequenos** por causa da recursão.

## Cut-off para insertion sort

**Solução:** *cut-off* para *insertion sort* para *sub-arrays* pequenos.

*Insertion sort*, mas começando no **d-ésimo** caractere.

```
void insert_sort_from(Item *a, int lo, int hi, int d) {
    for (int i = lo; i <= hi; i++) {
        for (int j = i; j > lo && less_from(a[j], a[j-1], d); j--) {
            exch(a[j], a[j-1]);
        }
    }
}
```

Relembrando: função `less_from()` compara as *strings* a partir do **d-ésimo** caractere.

**Modificar** a função recursiva como de costume.

```
void rec_MSD(String* *a, String* *aux, int lo, int hi, int d) {
    if (hi <= lo + CUTOFF - 1) {
        insert_sort_from(a, lo, hi, d);
        return;
    }
}
```

# MSD radix sort: desempenho

- MSD examina o **mínimo** de caracteres necessários para ordenar as chaves.
- Número de caracteres examinados **depende das chaves**.
- Pode ser **sub-linear** (no **melhor caso**) em relação ao tamanho da entrada!

Random (sublinear)	Non-random with duplicates (nearly linear)	Worst case (linear)
1EIO402	are	1DNB377
1HYL490	by	1DNB377
1ROZ572	sea	1DNB377
2HXE734	seashells	1DNB377
2IYE230	seashells	1DNB377
2XOR846	sells	1DNB377
3CDB573	sells	1DNB377
3CVP720	she	1DNB377
3IGJ319	she	1DNB377
3KNA382	shells	1DNB377
3TAV879	shore	1DNB377
4CQP781	surely	1DNB377
4QGI284	the	1DNB377
4YHV229	the	1DNB377

Characters examined by MSD string sort

# Sumário: desempenho dos algoritmos de ordenação

algorithm	guarantee	random	extra space	stable?
<b>insertion sort</b>	$\frac{1}{2} N^2$	$\frac{1}{4} N^2$	1	✓
<b>mergesort</b>	$N \lg N$	$N \lg N$	$N$	✓
<b>quicksort</b>	$1.39 N \lg N^*$	$1.39 N \lg N$	$c \lg N$	
<b>heapsort</b>	$3 N \lg N$	$3 N \lg N$	1	
<b>LSD sort †</b>	$W (3N + R)$	$W (3N + R)$	$N + R$	✓
<b>MSD sort ‡</b>	$W (3N + R)$	$N \log_R N$	$N + D R$	✓
<div> <div> * probabilistic  † fixed-length W keys  ‡ average-length W keys </div> <div> D = function-call stack depth  (length of longest prefix match) </div> </div>				

# MSD radix sort: análise empírica

## Casos de teste:

- dict: dicionário com as palavras embaralhadas contendo **370,099** palavras distintas.
- book: versão em texto simples do livro **Guerra e Paz**, de *Liev Tolstói*. Contém **562,639** palavras (com repetições).

Algorithm	dict	book
-----		
System qsort	0.409	0.559
Standard quick sort	0.430	0.499
Key-counting sort (Only works with strings of len = 1)		
LSD	0.967	0.601
MSD1: standard	1.327	0.309
MSD2: cut-off ins-sort	0.229	0.202

Note como **cut-off** para *insertion sort* faz diferença no MSD!

# MSD radix sort vs. quick sort

## Desvantagens do *MSD radix sort*:

- Espaço extra para `aux[]` e `count[]`.
- Loop interno tem muitas instruções.
- Acessa a memória “aleatoriamente” (ruim para cache).

## Desvantagens do *quick sort*:

- Número de comparações de *strings* não é linear.
- Precisa examinar várias vezes os mesmos caracteres quando há prefixos iguais longos.

## Objetivo:

- Combinar as vantagens de MSD e *quick sort*.
- Vantagem do MSD: examina cada caractere uma vez.
- Vantagem do *quicksort*: loop interno simples, faz bom uso do cache.



# American flag sort

Otimização 0: *cut-off* para *insertion sort*.

Otimização 1: Substituir recursão por uma **pilha explícita**.

- Empilha os *sub-arrays* a serem ordenados na pilha. (Igual *quick sort* não-recursivo.)
- Feito isso, basta **um único array** `count[]`.

Otimização 3: Faça o particionamento *R-way in place*.

- Elimina o array `aux[]`.
- Sacrifica estabilidade.



American national flag problem



Dutch national flag problem

## Engineering Radix Sort

Peter M. McIlroy and Keith Bostic  
University of California at Berkeley;  
and M. Douglas McIlroy  
AT&T Bell Laboratories

ABSTRACT: Radix sorting methods have excellent asymptotic performance on string data, for which comparison is not a unit-time operation. Attractive for use in large byte-addressable memories, these methods have nevertheless long been eclipsed by more easily programmed algorithms. Three ways to sort strings by bytes left to right—a stable list sort, a stable two-array sort, and an in-place “American flag” sort—are illustrated with practical C programs. For heavy-duty sorting, all three perform comparably, usually running at least twice as fast as a good quicksort. We recommend American flag sort for general use.