T2. Análise de Pior Caso, Melhor Caso, e Caso Médio

Copiar link

Análise de pior e melhor caso

Exemplo: o seguinte algoritmo de **procura linear** encontra a primeira ocorrência de k no array v, entre as posições a e b.

```
int procura (int v[], int a, int b, int k) {
  int i = a;
  while ((i<=b) && (v[i]!=k))
    i++;
  if (i>b)
    return -1;
  else return i;
}
```

A simples contagem do número de execuções das operações primitivas permite concluir que basta considerar como operação relevante a condição do ciclo, ou alternativamente a instrução `i++` . Consideraremos a primeira na nossa análise. Contaremos o número de *comparações* `(i<=b) && (v[i]!=k)` efectuadas.

Ora, o número de iterações do ciclo não é agora fixo: não depende apenas do tamanho do array, mas também do seu conteúdo concreto e do valor de `k`. Seja $N = b - a + 1$.

- **Pior Caso:** quando `k` não ocorre em `v[a..b]`
  O corpo do ciclo é executado N vezes, e são feitas $N + 1$ comparações.

- **Melhor Caso:** quando `k == v[a]`, ocorre na primeira posição.
  O corpo do ciclo é executado 0 vezes, e é feita apenas uma comparação.

Sendo assim, o algoritmo executa *no melhor caso em tempo constante*, e *no pior caso em tempo linear.* Escreveremos:

$$T(N) = \Omega(1), \mathcal{O}(N)$$

É importante perceber que esta análise de casos extremos é limitada. Em particular, não sabemos o que acontece *em média;* nem sabemos qual a probabilidade de ocorrência de cada um destes caso extremos.

No entanto, **a análise de pior caso é em geral considerada extremamente útil**, pelas seguintes razões:

- Constitui uma *garantia*, uma vez que nos dá um limite superior para o tempo de execução, válido para qualquer input do algoritmo
- Em muitos cenários o pior caso ocorre *muito frequentemente.* Por exemplo no algoritmo de pesquisa ordenada, existem certamente muitos valore de `k` que não ocorrem no array, e sempre que for feita uma pesquisa com um destes valores estaremos em presença do pior caso
- Por esta razão, o pior caso frequentemente coincide com o *caso médio*

Exemplo: algoritmo **Insertion sort**.

A função seguinte ordena o array A de forma crescente entre as posições 0 e N-1.

```
void insertionSort(int A[], int N) {
  int i, j, key;
  for (j=1 ; j<N ; j++) {
    key = A[j];
    i = j-1;
    while (i>=0 && A[i]>key) {
      A[i+1] = A[i];
```

```
      i--;
    }
    A[i+1] = key;
  }
}
```

Relembrando o funcionamento deste algoritmo, vai sendo construído um segmento inicial ordenado do array, satisfazendo o seguinte:

> ***Invariante de ciclo****: no início de cada iteração do ciclo `for`, o vector contém entre as posições 0 e j−1 os mesmos valores que lá estavam inicialmente, já ordenados.*

Em cada passo (i.e. cada iteração do ciclo `for` exterior) é inserido no segmento ordenado um novo elemento (`key`, que está inicialmente na posição j). O ciclo interior `while` copia para a posição seguinte os elementos *superiores* ao que vai ser inserido, por forma a criar espaço para a inserção de `key`.

Compreender o funcionamento do algoritmo é importante para a análise do seu tempo de execução. Comecemos por observar que, havendo ciclos aninhados, as operações relevantes são as do *ciclo interior.* Consideraremos como operação relevante a condição `(i>=0 && A[i]>key)` .

Notemos em seguida que o número de iterações do ciclo exterior é fixo (N-1), mas o número de iterações do ciclo interior é variável. O número de iterações do ciclo interior varia entre 0 e j, logo o número de vezes que a condição é avaliada varia entre 1 e j+1.

- **Pior Caso:** quando o elemento `key` a inserir é menor do que todos os elementos do segmento ordenado, o que quer dizer que `key` será inserido na posição 0 do array. Neste caso a condição é testada inicialmente com $i = j - 1$ e pela última vez com $i = -1$, um total de $j + 1$ vezes.
  Para que isto aconteça em todas as iterações do ciclo exterior, i.e. para todos os valores de `j`, é necessário que o array esteja inicialmente ***ordenado por ordem decrescente*** (inversa à pretendida). Neste caso o número total de vezes que a condição `(i>=0 && A[i]>key)` é avaliada será então

$$\sum_{j=1}^{N-1} j + 1 = \sum_{j=1}^{N-1} j + \sum_{j=1}^{N-1} 1 = \frac{(N-1)N}{2} + N - 1 = \frac{1}{2}N^2 + \frac{1}{2}N - 1.$$

- **Melhor Caso:** quando o elemento `key` a inserir é maior do que todos os elementos do segmento ordenado, o que quer dizer que `key` ficará na sua posição inicial (j). Neste caso a condição é testada uma única vez, falhando imediatamente.
  Para que isto aconteça em todas as iterações do ciclo exterior, i.e. para todos os valores de `j`, é necessário que o array esteja inicialmente ***já ordenado por ordem crescente***. Neste caso o número total de vezes que a condição `(i>=0 && A[i]>key)` é avaliada será então
  $\sum_{j=1}^{N-1} 1 = N - 1.$

Sendo assim, o algoritmo executa *no melhor caso em tempo linear*, e *no pior caso em tempo quadrático.* Escreveremos:

$$T(N) = \Omega(N), \mathcal{O}(N^2)$$

> ***Nota:*** *Não teria sido adequado optar por tomar como operação relevante (apenas) uma das atribuições no corpo do ciclo while, o que nos teria levado, incorrectamente, a um comportamento de tempo constante no melhor caso!!!*

EXERCÍCIO: procura num array ordenado

A função seguinte pode ser utilizada para procurar a primeira ocorrência de k em v, desde que este array se encontre *ordenado* de forma crescente.

```
// requires v ordenado de forma crescente entre os índices a e b
int procuraOrd (int v[], int a, int b, int k) {
  int i = a;
  while ((i<=b) && (v[i]<k))
    i++;
  if (i>b || v[i]!= k)
```

```
    return -1;
  else return i;
}
```

Identifique o melhor e o pior caso de execução desta função e analise os respectivos tempos de execução assimptóticos. Tendo em conta essa análise como compara esta função com a função `procura` anterior?

EXERCÍCIO: algoritmo de incremento de um array de bits

Considere-se a operação de incremento de um número inteiro, representado como array de bits (*bitvector*). O primeiro 0 do array, isto é, aquele que se encontra na posição "menos significativa", deverá passar a 1, sendo que todos os 1s que se encontram antes dele (i.e. em posições menos significativas) passarão a 0. Por exemplo:

- incrementar o bitvector 1010100**0** resulta em 1010100**1**
- incrementar o bitvector 0101**0111** resulta em 0101**1000**

Escreveremos o algoritmo em C considerando que os bitvectors são representados por arrays de números inteiros (com valor 0 ou 1), correspondendo o índice 0 ao bit menos significativo.

```
void inc (int b[], int N) {
  int i = 0;
  while ((i < N) && (b[i] == 1)) {
    b[i] = 0;
    i++;
  }
  if (i<N) b[i] = 1;
}
```

Identifique o melhor e o pior caso deste algoritmo (i.e. em que circunstâncias ocorrem), e analise o seu tempo de execução em cada um desses casos.

EXERCÍCIO: algoritmo de procura binária

A procura num array ordenado pode ser feita de forma mais eficiente do que anteriormente pelo seguinte algoritmo de *procura binária:*

```
// v ordenado de forma crescente entre os índices a e b
int procuraBin (int v[], int a, int b, int k) {
  int m, result := -1;
  while (a <= b && result == -1) {
    m = a + (b-a) / 2;
    if (vector[m] < k) a = m+1;
    else if (vector[m] > k) b = m-1;
         else result = m;
    }
    return result;
}
```

Analise o tempo de execução assimptótico do algoritmo no melhor e no pior caso. Diga em que situações ocorrem esses casos.

Exercícios Adicionais

1. Considere os dois seguintes algoritmos de multiplicação de números inteiros:

```
INT prod (INT x, INT y) {
    int r  = 0;
    while (y>0) {
```

```
        r = r+x;
        y = y-1;
    }
    return r;
}
INT bprod (INT x, INT y) {
    int r = 0;
    while (y>0) {
        if (y%2 != 0) r = r+x;
        x = x*2;
        y = y/2;
    }
    return r;
}
```

Como referido em +T1. Tempo de Execução de Algoritmos Iterativos, na análise deste tipo de algoritmos é importante ter em conta que o tamanho de um número não é o próprio número: a análise deve ser feita em função do comprimento da representação dos números.

Analise então o número de vezes que a operação representativa correspondente à avaliação da expressão `y>0` é executada, no melhor e no pior caso. Efectue a análise em função do número de *bits necessários para representar* `y`, no melhor e no pior caso, ou seja o seu tamanho útil. A análise em função do tamanho do tipo INT não faz muito sentido, uma vez que este tamanho é fixo, e a análise assimptótica pressupõe a variação do tamanho.

RESOLUÇÃO

Antes de mais vejamos alguns exemplos do número de bits necessários para representar alguns números:

- para representar 2 = 10 são necessários 2 bits
- para representar 7 = 111 são necessários 3 bits

- para representar 17 = 10001 são necessários 5 bits

Colocando a questão ao contrário: quais são os números que podem ser representados com, por exemplo, 4 bits?
Esta gama abrange os números desde 1000 = 8 até 1111 = 15.

Generalizando, com n bits é possível representar os números desde desde 2^{n-1} até $2^n - 1$.

Na função `prod` o número de avaliações de `y>0` é $y + 1$, e a variação de y entre 2^{n-1} e $2^n - 1$ permite identificar o melhor e o pior caso:

$T^{mc}(n) = 2^{n-1} + 1$, quando $y = 10\ldots0 = 2^{n-1}$

$T^{pc}(n) = 2^n$, quando $y = 11\ldots1 = 2^n - 1$

Em termos assimptóticos, o tempo de execução é em ambos os casos exponencial, $T(n) = \theta(2^n)$.

Já na função `bprod` o número de avaliações é substancialmente inferior.
Considerando os números representáveis por 4 bits, temos para y=8 que y toma sucessivamente os valores 8, 4, 2, 1, 0, e para y=15 toma os valores 15, 7, 3, 1, 0.
Temos então em ambos os casos 5 avaliações, e é fácil ver que em geral teremos $T(n) = n + 1 = \theta(n)$.

Uma forma de entender a diferença de funcionamento entre ambas as funções passa por observar a evolução dos números em representação binária.
Assim com `bprod` para y = 1000 temos 1000 → 100 → 10 → 1 → 0 (cada divisão por 2 corresponde a um *shift*), enquanto que com `prod` temos 1000 → 111 → 110 → 101 → 100 → 11 → 10 → 1 → 0.

---

2. Algoritmo de ordenação **Bubblesort**
   Este algoritmo, apesar de não ser considerado uma boa escolha (a análise empírica revela que de facto não é), é conceptualmente interessante. Tal como no **selection sort**, o passo básico coloca o i-ésimo elemento do vector na sua posição final, mas este passo inclui agora uma acção secundária, que vai

progressivamente contribuindo para ordenar os restantes elementos do array, o que significa que pode não ser necessário efectuar N passos básicos.

```
void bubbleSort (int v[], int N){
  int i, j=0, ok=0;
  while (!ok) {
    ok = 1;
    for (i=N-1; i>j; i--)
      if (v[i-1]>v[i]) {
        swap(v, i-1, i);
        ok = 0;
      }
    j++;
  }
}
```

a. Determine o melhor e o pior caso para o número de trocas (chamadas à função `swap`).
b. Determine o melhor e o pior caso para o número de comparações entre elementos do *array*.
c. Qual das operações deverá ser considerada a relevante do ponto de vista do tempo de execução do algoritmo? Efectue a análise assimptótica do tempo de execução no melhor e no pior caso.
d. O princípio em que se baseia este algoritmo (e o invariante do ciclo exterior) é o mesmo do algoritmo *selection sort*, mas o i-ésimo elemento do vector é agora colocado na posição final i através de uma sequência de operações `swap` entre *posições adjacentes* do array. O algoritmo incorpora uma optimização que consiste em parar quando a colocação de um elemento é conseguida sem que seja necessário um único `swap`, o que significa que o vector está já ordenado.
O algoritmo pode ser mais optimizado. Para o array `[10,20,30,40,80,70,60,50]` obtemos na primeira iteração do ciclo exterior `[10,20,30,40,50,80,70,60]`, sendo que o último `swap` efectuado nesta iteração envolveu as posições 4 (80) e 5 (50). Isto significa que os elementos

nas posições $0 \ldots 4$ estão já ordenados, podendo por isso ser deixados de fora da próxima iteração.
Implemente esta optimização e repita a análise de melhor e pior caso para o algoritmo optimizado.

3. Considere a seguinte função em C que determina se um vector de inteiros contém elementos repetidos.

```c
int repetidos (int v[], int N) {
    int i, j, rep = 0;
    for (i=0; i<N-1 && !rep; i++)
        for (j=i+1; j<N && !rep; j++)
            if (v[i]==v[j]) rep = 1;
    return rep;
}

```

   a. Identifique o melhor e o pior casos da execução desta função no que respeita ao número de comparações (entre elementos do vector).
   b. Quantas operações são executadas em cada caso? Efectue a análise assimptótica do tempo de execução em ambos os casos.

4. Relembre o algoritmo selection sort de +T1. Tempo de Execução de Algoritmos Iterativos:

```c
void selectionSort(int A[], int n) {
    int i, j, min, k;

    for (j=0; j < n-1; j++) {
        min = j;
        i = j+1;
        while (i < n) {
```

```
            if (A[min] > A[i]) min = i;
            i++;
        }
        if (j != min) swap (A, j, min);
    }
}
```

Claramente, a operação `swap` não é uma boa escolha para a análise assimptótica do tempo de execução. Apesar disso, proceda agora à análise do melhor e do pior caso do número de swaps executados, tendo particular cuidado com a identificação de inputs que levam ao pior caso.

Análise de caso médio

Em qualquer dos exemplos anteriores o melhor e o pior caso identificam um espectro de execuções possíveis do algoritmo, limitado inferiormente e superiormente por aqueles dois casos especiais. No entanto, a simples identificação dos casos extremos não nos fornece qualquer indicação sobre qual o comportamento do algoritmo em termos médios.

A análise de caso médio procura responder a esta questão, calculando o **valor esperado** do número de execuções das operações relevantes. Trata-se de uma noção estudada em Teoria de Probabilidades, mas que é suficientemente simples para poder ser aplicada sem grandes noções teóricas daquela área.

EXEMPLO: jogo de dados
[origem: http://www.wikihow.com/Calculate-an-Expected-Value#Finding_the_Expected_Value_of_a_Dice_Game_sub]

Imagine-se um jogo de dados com os seguintes prémios monetários:

- 30€ caso se obtenha um 6️⃣
- 20€ caso se obtenha um 5️⃣

Cada jogada tem no entanto um custo fixo de 10€.

Para calcularmos o valor esperado de uma jogada, começamos por calcular o saldo real de cada caso (resultado de uma jogada):

- 1️⃣ -10€
- 2️⃣ -10€
- 3️⃣ -10€
- 4️⃣ -10€
- 5️⃣ 10€
- 6️⃣ 20€

Calculamos agora o valor esperado como a soma pesada destes valores, tomando como pesos as probabilidades de ocorrência dos diferentes casos. Tratando-se de um dado, a probabilidade de ocorrer cada face é a mesma: $\frac{1}{6}$. Logo a probabilidade de o saldo real ser -10€ é $4/6$; a probabilidade de ser 10€ é $1/6$, e a probabilidade de ser 20€ é também $1/6$.

Sendo assim temos:
$E = \frac{4}{6}(-10) + \frac{1}{6}10 + \frac{1}{6}20$

Note-se que *a soma das probabilidades de todos os casos é sempre igual a uma unidade.* Neste caso $\frac{4}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} = 1$.

O valor esperado é então $E = -1.67$€, pelo que se trata de um jogo que, *em média, não compensa jogar.*

Exemplo: algoritmo de **procura linear**
Relembremos o algoritmo estudado acima. O que pretendemos agora é calcular o valor esperado da operação que foi considerada relevante para a análise de melhor e

pior caso (a comparação `(i<=b) && (v[i]!=k)`).

```
int procura (int v[], int a, int b, int k) {
  int i = a;
  while ((i<=b) && (v[i]!=k))
    i++;
  if (i>b)
    return -1;
  else return i;
}
```

Comecemos por simplificar a nossa análise admitindo que é certo que **k ocorre exactamente uma vez no array v.** Neste caso a condição `(i<=b)` será sempre verdadeira, uma vez que o ciclo terminará garantidamente antes de i ultrapassar o limite superior do array. Basta pois contar o número de comparações `(v[i]!=k)` entre k e elementos do array.

Admitimos também neste caso que k pode ocorrer *com igual probabilidade em qualquer posição do array. Então*, a probabilidade de esta ocorrência ser numa determinada posição i do array é de $\frac{1}{N}$, qualquer que seja i.

Naturalmente, o número de comparações `(v[i]!=k)` depende da posição em que k ocorrer pela primeira vez:

- 1 comparação se k ocorre na posição a
- 2 comparações se k ocorre na posição a+1
- ...
- N comparações se k ocorre na posição b

O *número esperado de comparações* pode então ser calculado escrevendo a soma pesada destes números, sendo o peso a probabilidade de cada caso, ou seja:

$$\frac{1}{N}1 \;+\; \frac{1}{N}2 \;+\; \ldots \;+\; \frac{1}{N}N$$

$$= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} i = \frac{N(N+1)}{2N} = \frac{N+1}{2}$$

Este resultado está de acordo com o que poderíamos intuitivamente esperar: se k ocorre com igual probabilidade em qualquer posição do array, então *em média* o número de comparações feitas será o correspondente à situação em que k ocorre no meio do array.

Consideremos agora o que acontece no outro caso, quando **k não ocorre no array v.** Neste caso o número de vezes que a condição `(i<=b) && (v[i]!=k)` é avaliada é sempre N+1 (N vezes incluindo `(v[i]!=k)` e uma vez `(i<=b)`), correspondente ao pior caso do algoritmo.

Como calcular agora o caso médio do tempo de execução no caso geral, combinando os dois casos anteriores? Mais uma vez se trata de uma combinação de casos, pelo que teremos que calcular a média pesada destes. Seja p a probabilidade de k ocorrer no array, ou seja a probabilidade do primeiro caso acima. Então, a probabilidade do segundo caso (k não ocorrer no array) será naturalmente $1 - p$.

Temos então que o valor esperado do número de comparações será, no caso geral:
$T(N) = p\frac{N+1}{2} + (1-p)(N+1)$

Simplificando vemos que se trata de uma expressão linear em N, qualquer que seja $p \in [0, 1]$.
$T(N) = (1 - \frac{p}{2})N + 1 - \frac{p}{2} = \Theta(N)$

Mas como pode ser calculada esta probabilidade p num caso concreto? Se se tratar de um array de números inteiros de m bits, existirão 2^m números diferentes, e assumindo aleatoriedade temos que a probabilidade de um destes números ocorrer num array com N números será $p = \frac{N}{2^m}$. Na prática em muitos cenários será $p \approx 0$, logo $T(N) \approx N + 1$, ou seja o comportamento de caso médio será igual ao do pior caso.

> *Em alternativa a este método baseado em contagem, quem tiver familiaridade com a noção de* **probabilidade condicionada** *pode alternativamente calcular da seguinte forma a* ***probabilidade de serem feitas i comparações:***

Para $i \leq N$, caso em que k ocorre no array, teremos a seguinte probabilidade:

probabilidade de k não ocorrer nas primeiras $i-1$ posições
*
probabilidade de k ocorrer na posição i, condicionada pelo facto de não ocorrer nas primeiras $i-1$ posições.

Ora, o efeito do condicionamento é aqui irrelevante (os valores guardados nas diversas posições do array são todos independentes), pelo que temos

$(1-\frac{1}{2^m})^{i-1} * \frac{1}{2^m}$

Quanto ao caso em que são feitas $N+1$ comparações, quando k não ocorre no array, temos probabilidade $(1-\frac{1}{2^m})^N$ de ocorrência deste cenário.

Sendo assim, temos
$T(N) = \left(\sum_{i=1}^{N}(1-\frac{1}{2^m})^{i-1} * \frac{1}{2^m} * i\right) + (1-\frac{1}{2^m})^N * (N+1)$

em que o segundo termo da soma corresponde à situação em que são feitas $N+1$ comparações porque k não ocorre em todo o array.
Este é o caso mais geral, em que nada é assumido sobre o número de ocorrências de k, que pode ser superior a 1. Para valores razoavelmente grandes de m, facilmente se vê que $T(N) \approx N+1$.

De que forma pode a probabilidade de serem feitas i comparações ser calculada no cenário em que k ocorre exactamente uma vez no array, usando probabilidades condicionadas?
Continuamos a ter:

probabilidade de k não ocorrer nas primeiras $i-1$ posições
*
probabilidade de k ocorrer na posição i, condicionada pelo facto de não ocorrer nas primeiras $i-1$ posições.

> *Neste cenário, a probabilidade de não ocorrer nas $i-1$ primeiras posições é igual à probabilidade de ocorrer nas $N-(i-1)$ restantes, sabendo que lá ocorre de certeza, ou seja $\frac{N-i+1}{N}$.*
>
> *Atente-se no cálculo desta probabilidade: uma vez que k ocorre de certeza numa das N posições, existem N possibilidades diferentes, e a probabilidade de ocorrer num qualquer segmento do array de comprimento l é $\frac{l}{N}$.*
>
> *Por outro lado, **o condicionamento agora é importante**: o facto de k não ocorrer nas $i-1$ primeiras posições implica que ocorra necessariamente nas $N-i+1$ últimas posições. A probabilidade condicionada de ocorrer na posição i é então $\frac{1}{N-i+1}$, pelo que a probabilidade de serem feitas i comparações é dada por*
>
> $\frac{N-i+1}{N} * \frac{1}{N-i+1} = \frac{1}{N}$
>
> *Note-se que esta probabilidade condicionada tem o valor $\frac{1}{N-i+1}$ apenas porque se sabe que k ocorre **exactamente** uma vez. O cenário em que k ocorre pelo menos uma vez não permite simplificação, sendo tratado no caso geral.*

Exemplo: algoritmo de incremento de um array de bits

O exemplo que acabamos de ver ilustra uma situação comum, em que o caso médio do tempo de execução coincide com o pior caso. Vejamos agora um exemplo em que isso não se verifica.

Recorde a operação de incremento de um número inteiro, representado como array de bits. O primeiro 0 do array, isto é, aquele que se encontra na posição "menos significativa", deverá passar a 1, sendo que todos os 1s que se encontram antes dele (i.e. em posições menos significativas) passarão a 0. Por exemplo:

- incrementar o bitvector 1010100**0** resulta em 1010100**1**
- incrementar o bitvector 0101**0111** resulta em 0101**1000**

```
void inc (int b[], int N) {
  int i = 0;
  while ((i < N) && (b[i] == 1)) {
    b[i] = 0;
    i++;
  }
  if (i<N) b[i] = 1;
}
```

Naturalmente, assumiremos que todos os bitvectors (inputs) possíveis ocorrem com igual probabilidade.

Consideremos como operação primitiva relevante o número de *bit flips* efectuados correspondentes a *passagens do valor de um bit de 1 a 0 ou de 0 a 1*.
Este número varia entre os casos extremos:

- 1 bit flip quando *o bit menos significativo (índice 0) é 0*, e
- N bit flips quando *os N-1 bits menos significativos têm valor 1.*

Para calcular o valor esperado do número de bit flips teremos que efectuar a habitual soma pesada, mas tendo em conta que **a probabilidade não é agora a mesma para os diversos casos.** Assim,

- metade dos bitvectors de comprimento N têm o bit menos significativo 0;
- dos restantes, metade têm o segundo bit menos significativo 0, i.e. termina em 01;
- dos restantes, metade têm o segundo bit menos significativo 0, i.e. termina em 001;
- e assim sucessivamente.

Temos então

$$T(N) = 1 \text{ flip} * \frac{1}{2} + 2 \text{ flips} * \frac{1}{4} + 3 \text{ flips} * \frac{1}{8} + \ldots + \mathbf{N} * \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2^N}} + \mathbf{N} * \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2^N}}$$

Dos últimos dois termos iguais a $\mathbf{N} * \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2^N}}$, o primeiro corresponde à situação em que todos os bits são 1 excepto o mais significativo, e o segundo à situação em que todos são 1. Em ambos os casos são feitos N bit flips. Por exemplo, com 4 bits, haverá 4 bit flips quer com 0111 → 1111 quer com 1111 → 0000.

$$T(N) = \sum_{k=1}^{N} k * \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2^k}} + \mathbf{N} * \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2^N}}$$

E logo, uma vez que $\sum_{k=1}^{\infty} k/2^k = 2$,
$T(N) < 2 = \mathcal{O}(1)$

Trata-se pois de um algoritmo cujo comportamento é, no caso médio, assimptoticamente igual ao comportamento no melhor caso.

> *Em alternativa a este método baseado em contagem, quem tiver familiaridade com a noção de* **probabilidade condicionada** *pode alternativamente calcular a probabilidade $\frac{1}{2^k}$ de ocorrerem k bit flips da seguinte forma:*
>
> probabilidade de os $k-1$ bits menos significativos serem 1
> *
> probabilidade de o bit k ser 0, condicionada ao facto de os $k-1$ menos significativos serem 1
>
> *Ora, o efeito do condicionamento é aqui irrelevante (os valores dos bits são todos independentes), pelo que temos*
> $(\frac{1}{2})^{k-1} * \frac{1}{2} = \frac{1}{2^k}$
>
> *(ignora-se aqui o caso adicional de k=N com todos os bits a 1, explicado em cima)*

EXERCÍCIO: algoritmo **Insertion sort**

```
void insertionSort(int A[], int N) {
  int i, j, key;
  for (j=1 ; j<N ; j++) {
    key = A[j];
```

```
    i = j-1;
    while (i>=0 && A[i]>key) {
      A[i+1] = A[i];
      i--;
    }
    A[i+1] = key;
  }
}
```

RESOLUÇÃO
Relembremos: o número de iterações do ciclo exterior é fixo (N-1), e para cada valor de j, o número de vezes que a condição `(i>=0 && A[i]>key`) do ciclo interior é avaliada (que é a operação considerada anteriormente para a análise) pode variar entre 1 e j+1. Se escrevermos n_j para designar este número, o número de operações relevantes efectuadas pode ser escrito como

$T(N) = \sum_{j=1}^{N-1} n_j$, com $1 \leq n_j \leq j+1$.

Para calcularmos o *valor esperado* deste número, temos mais uma vez que assumir *aleatoriedade* no preenchimento do array, o que implicará que a probabilidade de a inserção ser feita em qualquer posição do segmento já ordenado do *array* é **a mesma**. Temos $j+1$ situações diferentes, pelo que o valor deste probabilidade é $\frac{1}{j+1}$.

Sendo assim, o valor esperado do número de vezes que a condição `i>=0 && A[i]>key` é avaliada, para um determinado valor de j, é

$n_j = \sum_{k=1}^{j+1} \frac{1}{j+1} k = \frac{1}{j+1} \sum_{k=1}^{j+1} k = \frac{1}{j+1} \frac{(j+1)(j+2)}{2} = \frac{j}{2} + 1.$

Note-se que, este valor esperado a que chegamos vai de encontro à seguinte intuição:

> *Uma vez que assumimos que o array foi preenchido aleatoriamente, então em cada iteração do ciclo exterior, de entre os elementos do segmento ordenado do array (entre as posições 0 e j-1), metade dos elementos é superior a* `A[j]`.

Ou seja, "em média", a inserção será feita a meio do segmento já ordenado do *array*.

Considerando agora o tempo global de execução do algoritmo, temos assim $T(N) = \sum_{j=1}^{N-1}(\frac{j}{2}+1)$

$$T(N) = \frac{1}{2}\frac{(N-1)N}{2} + N - 1 = \frac{1}{4}N^2 + \frac{3}{4}N - 1 = \Theta(N^2)$$

O comportamento no caso médio é assimptoticamente quadrático (tal como no pior caso). Trata-se de uma conclusão importante, uma vez que o comportamento de melhor caso (linear) é muito promissor — em média, o comportamento do *insertion sort* não é melhor do que o do *selection sort*.

EXERCÍCIO: algoritmo de procura num array ordenado

```
// requires v ordenado de forma crescente entre os índices 0 e N-1
int procuraOrd (int v[], int N, int k) {
  int i = 0;
  while ((i<N) && (v[i]<k))
    i++;
  if (i>N-1 || v[i]!= k)

    return -1;
  else return i;
}
```

Calcule o caso médio do tempo de execução deste algoritmo, estimando o valor esperado do número de comparações (<). Para isso, assuma que o array ordenado está preenchido de forma aleatória com valores dentro de uma dada gama, e que k é escolhido aleatoriamente dentro dessa gama.