

Complexidade computacional

Classifica os problemas em relação à dificuldade de resolvê-los algoritmicamente.

CLRS 34

Palavras

Para resolver um problema usando um computador é necessário descrever os dados do problema através de uma **sequência de símbolos** retirados de algum **alfabeto**.

Este alfabeto pode ser, por exemplo, o conjunto de símbolos **ASCII** ou o conjunto **{0, 1}**.

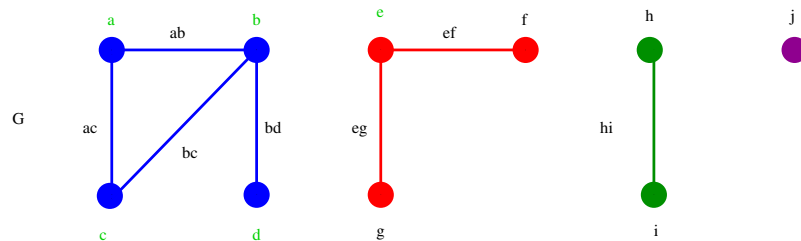
Qualquer sequência de elementos de um alfabeto é chamada de uma **palavra**.

Não é difícil codificar objetos tais como **racionais, vetores, matrizes, grafos e funções** como palavras.

O **tamanho** de uma palavra w , denotado por $\langle w \rangle$, é o número de símbolos usados em w , contando multiplicidades. O tamanho do racional '123/567' é **7**.

Exemplo 1

Grafo



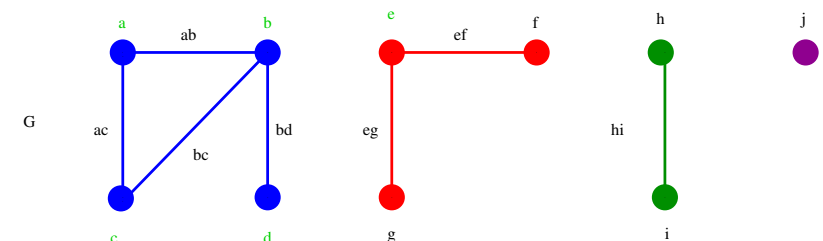
Palavra:

$\langle \{a, b, c, d, e, f, g, h, i, j\}, \{\{bd\}, \{eg\}, \{ac\}, \{hi\}, \{ab\}, \{ef\}, \{bc\}\} \rangle$

Tamanho da palavra: **59**

Exemplo 2

Grafo com função de peso nas arestas:



Palavra:

$\langle (\{bd\}, 2), (\{eg\}, 1), (\{ac\}, 0), (\{hi\}, -3), (\{ab\}, 3/2), (\{ef\}, 7), (\{bc\}, 0) \rangle$

Tamanho da palavra: **67**

Tamanho de uma palavra

Para os nossos propósitos,
não há mal em subestimar o tamanho de um objeto.

Não é necessário contar rigorosamente os caracteres '{', '}', '(', ')', e ',' dos exemplos anteriores.

Tamanho de um inteiro p é essencialmente $\lg|p|$.

Tamanho do racional p/q é essencialmente $\lg|p| + \lg|q|$.

Tamanho de um vetor $A[1..n]$ é a soma dos tamanhos de seus componentes

$$\langle A \rangle = \langle A[1] \rangle + \langle A[2] \rangle + \dots + \langle A[n] \rangle.$$

Problemas e instâncias

Cada conjunto específico de dados de um problema define uma **instância**.

Tamanho de uma instância é o tamanho de uma palavra que representa a instância.

Problema que pede uma resposta do tipo **SIM** ou **NÃO** é chamado de **problema de decisão**.

Problema que procura um elemento em um conjunto é um **problema de busca**.

Problema que procura um elemento de um conjunto de soluções viáveis que seja **melhor possível** em relação a algum critério é um **problema de otimização**.

Máximo divisor comum

Problema: Dados dois números inteiros não-negativos a e b , determinar $\text{mdc}(a, b)$.

Exemplo:

máximo divisor comum de 30 e 24 é 6

máximo divisor comum de 514229 e 317811 é 1

máximo divisor comum de 3267 e 2893 é 11

Problema de busca

Instância: a e b

Tamanho da instância: $\langle a \rangle + \langle b \rangle$,

$$\lg a + \lg b.$$

Consumo de tempo do algoritmo **CAFÉ-COM-LEITE** é $O(b)$.

Consumo de tempo do algoritmo **EUCLIDES** é $O(\lg b)$.

Máximo divisor comum (decisão)

Problema: Dados números inteiros não-negativos a , b e k , $\text{mdc}(a, b) = k$?

Exemplo:

máximo divisor comum de 30 e 24 é 6

máximo divisor comum de 514229 e 317811 é 1

máximo divisor comum de 3267 e 2893 é 11

Problema de decisão: resposta **SIM** ou **NÃO**

Instância: a , b , k

Tamanho da instância: $\langle a \rangle + \langle b \rangle + \langle k \rangle$, essencialmente

$$\lg a + \lg b + \lg k$$

Subsequência comum máxima

Problema: Encontrar uma **ssco máxima** de $X[1..m]$ e $Y[1..n]$.

Exemplos: $X = A B C B D A B$
 $Y = B D C A B A$
ssco máxima = $B C A B$

Problema de otimização

Instância: $X[1..m]$ e $Y[1..n]$

Tamanho da instância: $\langle X \rangle + \langle Y \rangle$, essencialmente

$$m + n$$

Consumo de tempo **REC-LCS-LENGTH** é $\Omega(2^{\min(m,n)})$.

Consumo de tempo **LCS-LENGTH** é $\Theta(mn)$.

Subsequência comum máxima (decisão)

Problema: $X[1..m]$ e $Y[1..n]$ possuem uma **ssco** $\geq k$?

Exemplo: $X = A B C B D A B$
 $Y = B D C A B A$
ssco máxima = $B C A B$

Problema de decisão: resposta **SIM** ou **NÃO**

Instância: $X[1..m]$, $Y[1..n]$, k

Tamanho da instância: $\langle X \rangle + \langle Y \rangle + \langle k \rangle$, essencialmente

$$n + m + \lg k$$

Problema booleano da mochila

Problema (Knapsack Problem): Dados n , $w[1..n]$ $v[1..n]$ e W , encontrar uma **mochila booleana ótima**.

Exemplo: $W = 50$, $n = 4$

	1	2	3	4
w	40	30	20	10
v	840	600	400	100
x	0	1	1	0

valor = 1000

Problema de otimização

Instância: n , $w[1..n]$ $v[1..n]$ e W

Tamanho da instância: $\langle n \rangle + \langle w \rangle + \langle v \rangle + \langle W \rangle$, essencialmente

$\lg n + n \lg W + n \lg V + \lg W$

Consumo de tempo **MOCHILA-BOOLEANA** é $\Theta(nW)$.

Problema booleano da mochila (decisão)

Problema (Knapsack Problem): Dados n , $w[1..n]$ $v[1..n]$ e W e k , existe uma **mochila booleana** de valor $\geq k$.

Exemplo: $W = 50$, $n = 4$, $k = 1010$

	1	2	3	4
w	40	30	20	10
v	840	600	400	100
x	0	1	1	0

valor = 1000

Problema de decisão: resposta **SIM** ou **NÃO**

Instância: n , $w[1..n]$ $v[1..n]$, W e k

Tamanho da instância: $\langle n \rangle + \langle w \rangle + \langle v \rangle + \langle W \rangle + \lg k$, essencialmente

$\lg n + n \lg W + n \lg V + \lg W + \lg k$.

Problema fracionário da mochila

Problema: Dados n , $w[1..n]$, $v[1..n]$ e W , encontrar uma **mochila ótima**.

Exemplo: $W = 50$, $n = 4$

	1	2	3	4	
w	40	30	20	10	
v	840	600	400	100	
x	1	1/3	0	0	valor = 1040

Problema de otimização

Instância: n , $w[1..n]$, $v[1..n]$ e W

Tamanho da instância: $\langle n \rangle + \langle w \rangle + \langle v \rangle + \langle W \rangle$, essencialmente $\lg n + n \lg W + n \lg V + \lg W$

Consumo de tempo **MOCHILA-FRACIONÁRIA** é $\Theta(n \lg n)$.

Problema fracionário da mochila (decisão)

Problema: Dados n , $w[1..n]$, $v[1..n]$, W e k , existe uma **mochila** de valor $\geq k$?

Exemplo: $W = 50$, $n = 4$, $k = 1010$

	1	2	3	4	
w	40	30	20	10	
v	840	600	400	100	
x	1	1/3	0	0	valor = 1040

Problema de decisão: resposta **SIM** ou **NÃO**

Instância: n , $w[1..n]$, $v[1..n]$, W e k

Tamanho da instância: $\langle n \rangle + \langle w \rangle + \langle v \rangle + \langle W \rangle + \langle k \rangle$, essencialmente $\lg n + n \lg W + n \lg V + \lg W + \lg k$

Modelo de computação

É uma descrição abstrata e conceitual de um computador que será usado para executar um algoritmo.

Um modelo de computação especifica as **operações elementares** que um algoritmo pode executar e o critério empregado para medir a quantidade de tempo que cada operação consome.

Operações elementares típicas são operações aritméticas entre números e comparações.

No **critério uniforme** supõe-se que cada operação elementar consome uma **quantidade de tempo constante**.

Problemas polinomiais

Análise de um algoritmo em determinado modelo de computação estima seu **consumo de tempo** e **quantidade de espaço** como função do **tamanho da instância do problema**.

Exemplo: o consumo de tempo do algoritmo **EUCLIDES** (a, b) é expresso como uma função de $\langle a \rangle + \langle b \rangle$.

Um problema é **solúvel em tempo polinomial** se existe um algoritmo que consome tempo $O(\langle l \rangle^\alpha)$ para resolver o problema, onde α é uma constante e l é uma instância do problema.

Exemplos

- ▶ Máximo divisor comum

Tamanho da instância: $\lg a + \lg b$

Consumo de tempo:

CAFÉ-COM-LEITE é $O(b)$ (não-polinomial)

EUCLIDES é $O(\lg b)$ (polinomial)

- ▶ Subsequência comum máxima

Tamanho da instância: $n + m$

Consumo de tempo:

REC-LCS-LENGTH é $\Omega(2^{\min\{m,n\}})$ (exponencial)

LCS-LENGTH é $\Theta(mn)$ (polinomial)

Mais exemplos

- ▶ Problema booleano da mochila

Tamanho da instância: $\lg n + n \lg W + n \lg V + \lg W$

Consumo de tempo:

MOCHILA-BOOLEANA é $\Theta(nW)$ (não-polinomial).

- ▶ Problema fracionário da mochila

Tamanho da instância: $\lg n + n \lg W + n \lg V + \lg W$

Consumo de tempo:

MOCHILA-FRACIONÁRIA é $\Theta(n \lg n)$ (polinomial).

- ▶ Ordenação de inteiros $A[1..n]$

Tamanho da instância: $n \lg M$, onde

$M := \max\{|A[1]|, |A[2]|, \dots, |A[n]|\} + 1$

Consumo de tempo:

MERGESORT é $\Theta(n \lg n)$ (polinomial).

Classe P

Algoritmo polinomiais são uma abstração de algoritmos eficientes.

Dava para ter outra?

Seria interessante que a classe de algoritmos eficientes satisfizesse:

- ▶ Suponha que um algoritmo A usa um algoritmo B como subrotina e, contando B como passo elementar A é relativamente eficiente. Então, se B é eficiente, A também é.
- ▶ Algoritmos lineares são eficientes.

Isso leva à classe dos polinomiais como a menor que é eficiente.

Lucro: fazer transformações polinomiais nos dados “é permitido”.

Classe P

Algoritmo polinomiais são uma abstração de algoritmos eficientes.

A classe de todos os problemas de decisão que podem ser resolvidos por algoritmos polinomiais é denotada por P (classe de complexidade).

Exemplo: As versões de decisão dos problemas:

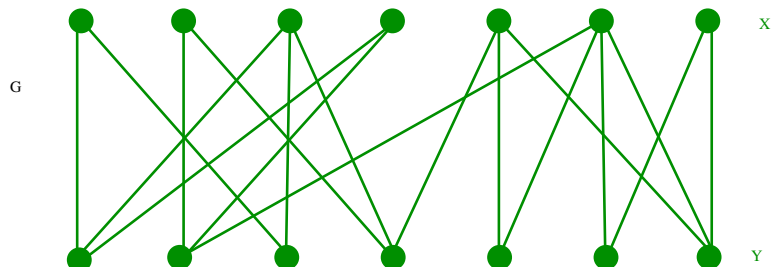
máximo divisor comum, subsequência comum máxima e mochila fracionária

estão em P .

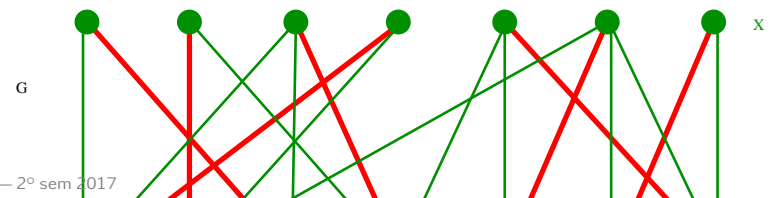
Para muitos problemas, não se conhece algoritmo essencialmente melhor que “testar todas as possibilidades”. Em geral, isso não está em P .

Emparelhamentos

Problema: Dado um grafo bipartido, encontrar um emparelhamento perfeito.

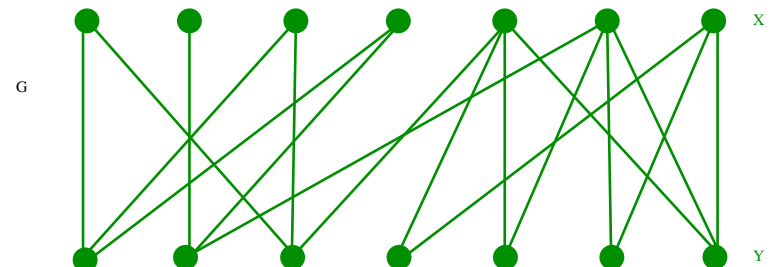


Problema: Dado um grafo bipartido, encontrar um emparelhamento perfeito.

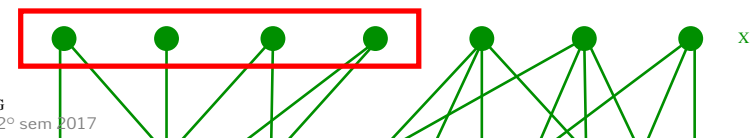


Emparelhamentos

Problema: Dado um grafo bipartido, encontrar um emparelhamento perfeito.

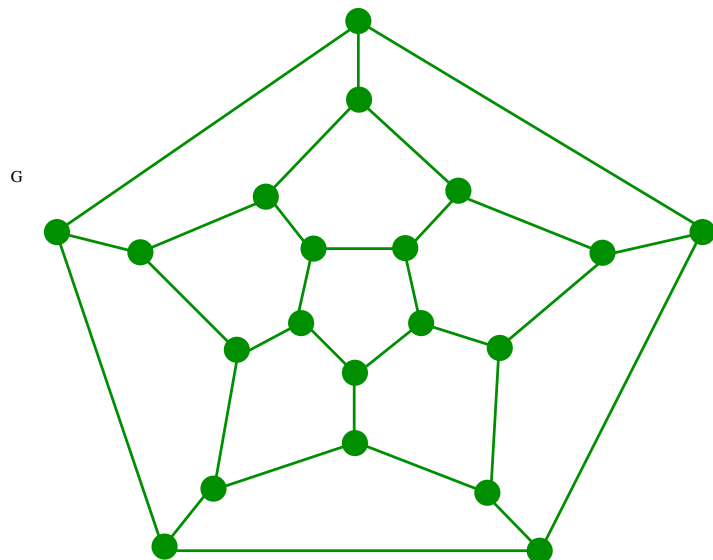


NÃO existe! Certificado?
Problema: Dado um grafo bipartido, encontrar um emparelhamento bipartido.

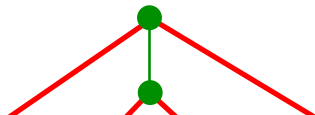


Grafos hamiltonianos

Problema: Dado um grafo, encontrar um ciclo hamiltoniano.

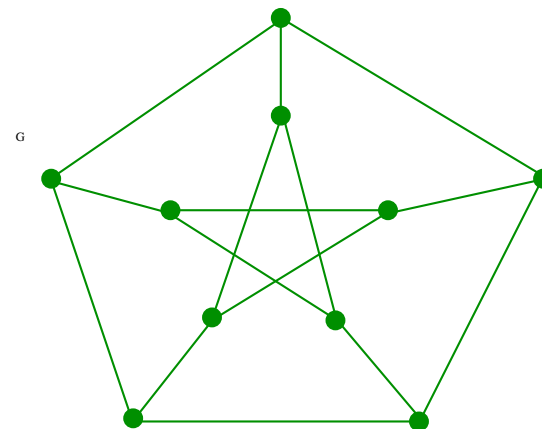


Problema: Dado um grafo, encontrar um ciclo hamiltoniano.



Grafos hamiltonianos

Problema: Dado um grafo, encontrar um ciclo hamiltoniano.



NÃO existe! Certificado? Hmmm ...

Verificador polinomial para SIM

Um **verificador polinomial para a resposta SIM** a um problema Π é um algoritmo polinomial **ALG** que **recebe**

*uma instância I de Π e um objeto C ,
tal que $\langle C \rangle$ é $O(\langle I \rangle^\alpha)$ para alguma constante α*

e **devolve**

SIM para algum C se a resposta a $\Pi(I)$ é **SIM**;
NÃO para todo C se a resposta a $\Pi(I)$ é **NÃO**.

No caso de resposta **SIM**, o objeto C é dito um **certificado polinomial** ou **certificado curto** da resposta **SIM** a $\Pi(I)$.

Exemplos

- ▶ Se G é hamiltoniano, então um ciclo hamiltoniano de G é um certificado polinomial:

dados um grafo G e C , pode-se verificar em tempo $O(\langle G \rangle)$ se C é um ciclo hamiltoniano.

- ▶ se $X[1..m]$ e $Y[1..n]$ possuem uma sscó $\geq k$, então uma subsequência comum $Z[1..k]$ é um certificado polinomial:

dados $X[1..m]$, $Y[1..n]$ e $Z[1..k]$, pode-se verificar em tempo $O(m+n)$ se Z é sscó de X e Y .

- ▶ se n é um número composto, então um divisor próprio $d > 1$ de n é um certificado polinomial.

Verificado polinomial para NÃO

Um **verificador polinomial para a resposta NÃO** de um problema Π é um algoritmo polinomial **ALG** que **recebe**

*uma instância I de Π e um objeto C ,
tal que $\langle C \rangle$ é $O(\langle I \rangle^\alpha)$ para alguma constante α*

e **devolve**

SIM para algum C se a resposta a $\Pi(I)$ é **NÃO**;
NÃO para todo C se a resposta a $\Pi(I)$ é **SIM**.

No caso de resposta **SIM**, o objeto C é dito um **certificado polinomial** ou **certificado curto** da resposta **NÃO** a $\Pi(I)$.

Classe NP

Formada pelos **problemas de decisão** que possuem um **verificador polinomial para a resposta SIM**.

Em outras palavras, a classe **NP** é formada pelos **problemas de decisão** Π para os quais existe um problema Π' em **P** e uma função polinomial $p(n)$ tais que, para cada instância I do problema Π , existe um objeto C com $\langle C \rangle \leq p(\langle I \rangle)$ tal que

*a resposta a $\Pi(I)$ é **SIM** se e somente se
a resposta a $\Pi'(I, C)$ é **SIM**.*

O objeto C é dito um **certificado polinomial** ou **certificado curto** da resposta **SIM** a $\Pi(I)$.

Problemas de decisão com certificado polinomial para SIM:

- ▶ existe subsequência crescente $\geq k$?
- ▶ existe subcoleção disjunta $\geq k$ de intervalos?
- ▶ existe mochila booleana de valor $\geq k$?
- ▶ existe mochila de valor $\geq k$?
- ▶ existe subsequência comum $\geq k$?
- ▶ grafo tem ciclo de comprimento $\geq k$?
- ▶ grafo tem ciclo hamiltoniano?
- ▶ grafo tem emparelhamento (casamento) perfeito?

Todos esses problemas estão em NP.

Prova:

se Π é um problema em P, então pode-se tomar a sequência de instruções realizadas por um algoritmo polinomial para resolver $\Pi(I)$ como certificado polinomial da resposta SIM a $\Pi(I)$.

Outra prova:

Pode-se construir um verificador polinomial para a resposta SIM a Π utilizando-se um algoritmo polinomial para Π como subrotina e ignorando-se o certificado C.

$P \neq NP?$

É crença de muitos que a classe NP é maior que a classe P, ainda que isso

não tenha sido provado até agora.

Este é o intrigante problema matemático conhecido pelo rótulo “ $P \neq NP?$ ”

Não confunda NP com “não-polinomial”.

A solução óbvia

Todos que tomam conhecimento desse problema pela primeira vez aparecem com a solução

$$N = 1$$

Não é considerada muito original:

A primeira ocorrência disto apareceu no **rascunho da bíblia**.

Classe co-NP

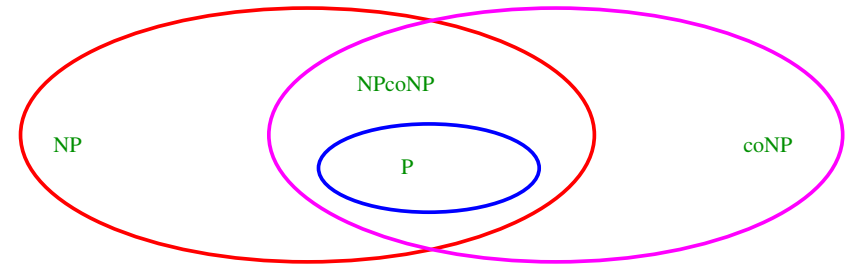
A classe **co-NP** é definida trocando-se **SIM** por **NÃO** na definição de **NP**.

Um problema de decisão Π está em **co-NP** se admite um **certificado polinomial** para a resposta **NÃO**.

Os problemas em $\text{NP} \cap \text{co-NP}$ admitem certificados polinomiais para as respostas **SIM** e **NÃO**.

Em particular, $\text{P} \subseteq \text{NP} \cap \text{co-NP}$.

P, NP e co-NP



$\text{P} \neq \text{NP}?$

$\text{NP} \cap \text{co-NP} \neq \text{P}?$

$\text{NP} \neq \text{co-NP}?$