

# Recurrencias lineales homogéneas

**Universidad del Valle**  
**EISC**

Septiembre 2018

1 Introducción a las recurrencias

2 Recurrencias lineales homogéneas

# Complejidades en $O$

Complejidad	Terminología
$O(1)$	Complejidad constante
$O(\log n)$	Complejidad logarítmica
$O(n)$	Complejidad lineal
$O(n \log n)$	Complejidad $n \log n$
$O(n^b)$ , donde $b$ es un racional, $b > 1$	Complejidad polinómica
$O(b^n)$ , donde $b > 1$	Complejidad exponencial
$O(n!)$	Complejidad factorial

$O(n^2)$

## 1 Introducción a las recurrencias

## 2 Recurrencias lineales homogéneas

- Las relaciones de recurrencia juegan un papel importante en el estudio de los algoritmos.
- La programación dinámica en la cual el algoritmo parte un problema e varios subproblemas.
- La complejidad de tales algoritmos puede ser analizada usando especiales relaciones de recurrencia.
- También la complejidad de los algoritmos de divide y vencerás pueden ser analizados mediante relaciones de recurrencias.
- Podemos resolver problemas avanzados de conteo usando las funciones generatrices para resolver relaciones de recurrencias.

## Problema bacterias

Suponga que el número de bacterias de una colonia se dobla a cada hora. Si la colonia comienza con 5 bacterias. ¿Cuántas bacterias habrán en  $n$  horas?

- 1 Sea  $a_n$  el número de bacterias al final de las  $n$  horas.
- 2 Como el número de bacterias de doble cada hora tenemos la relación  $a_n = 2a_{n-1}$  para  $n \in \mathbb{Z}^+$ .
- 3 Por lo tanto al cabo de 5 horas habrán : Sea  $a_0 = 5$

$$a_1 = 2a_0 = 2 \cdot 5 = 10$$

$$a_2 = 2a_1 = 2 \cdot 10 = 20$$

$$a_3 = 2a_2 = 2 \cdot 20 = 40$$

$$a_4 = 2a_3 = 2 \cdot 40 = 80$$

$$a_5 = 2a_4 = 2 \cdot 80 = 160$$

# Problema de los conejos ( $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$ )

## Problema conejos

Una pareja de conejos recién nacidos (uno de cada sexo) se sueltan en una isla. Los conejos no pueden tener descendencia hasta que cumplan dos meses, cada pareja tiene como descendencia otra pareja de conejos cada mes. Encuentre el número de conejos una vez transcurridos  $n$  meses.

mes	Parejas Repro.	Parejas Jov
1	0	$1_A$
2	0	$1_A$
3	$1_A$	$1_B$
4	$1_A$	$1_B + 1_C$
5	$1_A + 1_B$	$1_B + 1_C + 1_D$
6	$1_A + 1_B + 1_C$	$1_B + 1_B + 1_C + 1_D + 1_E$
7	$1_A + 1_B + 1_C + 1_B + 1_D$	$1_B + 1_B + 1_B + 1_C + 1_C + 1_D + 1_E + 1_F$

$$Q_n = Q_{n-1} + Q_{n-2}$$

$$Q_1 = 1 \quad Q_2 = 1$$

## Problema de los conejos ( $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$ )

mes	Parejas Repro.	Parejas Jov
1	0	$1_A$
2	0	$1_A$
3	$1_A$	$1_B$
4	$1_A$	$1_B + 1_C$
5	$1_A + 1_B$	$1_{B_1} + 1_C + 1_D$
6	$1_A + 1_B + 1_C$	$1_{B_1} + 1_{B_2} + 1_{C_1} + 1_D + 1_E$
7	$1_A + 1_B + 1_C + 1_{B_1} + 1_D$	$1_{B_{11}} + 1_{B_2} + 1_{B_3} + 1_{C_1} + 1_{C_2} + 1_{D_1} + 1_E + 1_F$

- 1 El primer mes el número de parejas jóvenes de conejos es  $f_1 = 1$  si  $f_n$  es el número de parejas en  $n$  meses.
- 2 Durante el segundo mes  $f_2 = 1$  y  $f_{n-1}$  el número de parejas que había el mes anterior.
- 3  $f_{n-2}$  es el número de parejas en cada nacimiento par.



# Número de Fibonacci

## Problemas de conejos como una relación de recurrencia

Sea  $f_1 = 1$  y  $f_2 = 1$  entonces

$$f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$$

para  $n \geq 3$

# Problema bancario

## Problema bancario

Supongamos que una persona deposita 10000 pesos en una cuenta bancaria que le proporciona un interés anual del 11%. Si los intereses se abonan a la misma cuenta. ¿Cuanto dinero habrá en la cuenta al cabo de 30 años?

Sea  $P_n$ : saldo de la cuenta la cabo de  $n$  años.

$P_{n-1}$ : saldo de la cuenta transcurridos  $n - 1$  años.

$0.11P_{n-1}$  es el interés y  $P_{n-1}$  es el saldo. Por lo tanto, para  $P_0 = 10000$

$$P_n = P_{n-1} + 0.11P_{n-1} = 1.11P_{n-1}$$

Calculamos  $P_1, P_2, \dots, P_n$

## Problema bancario

$$P_n = P_{n-1} + 0.11P_{n-1} = 1.11P_{n-1}$$

Calculamos  $P_1, P_2, \dots, P_n$

$$P_1 = 1.11P_0$$

$$P_2 = 1.11(\cancel{1.11})P_1 = (1.11)^2 P_0$$

$$P_3 = 1.11P_2 = (1.11)^3 P_0$$

$$\vdots$$

$$P_n = (1.11)^n P_0$$

# Problema bacterias

Suponga que el número de bacterias de una colonia se triplica a cada hora.

- 1 Determinar una relación de recurrencia para el número de bacterias después de transcurridas  $n$  horas

$$a_n = 3a_{n-1}$$

$$Q_1 = 3Q_0$$

$$Q_3 = 3^3 Q_0$$

$$Q_2 = 3^2 Q_0$$

$$Q_n = 3^n Q_0$$

## Problema bacterias

- 2 Si se utilizan 100 bacterias para empezar una nueva colonia ¿Cuántas bacterias habrá en la colonia después de diez horas?  $a_0 = 100$

$$a_1 = 3a_0$$

$$a_1 = 3(100)$$

$$a_2 = 3 \cdot 3(100)$$

$$a_3 = 3 \cdot 3 \cdot 3(100)$$

$$\vdots$$

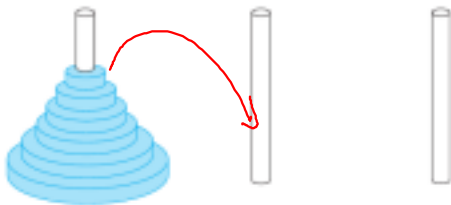
$$a_n = 3^n(100)$$


Si  $n = 10$  tenemos  $a_{10} = 3^{10}(100)$  bacterias.

# Torres de Hanoi

Se componen tres barras montadas sobre una base cada una junto con discos de diferentes tamaños. Reglas del juego:

1. Los discos se mueven de uno en uno.
2. Un disco no se puede colocar encima de otro más pequeño.
3. Los discos colocados en la primera barra se deben colocar en la segunda barra ordenados con el de mayor base.



$$a_n = 2a_{n-1} + 1$$


$$n = 1$$

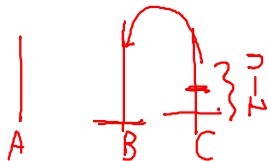
$$a_1 = 1$$

$$a_1 = 1$$



$$n = 2$$

$$a_2 = 3$$



$$n = 3$$

$$a_3 = 7$$

$$a_4 = 15 \quad a_5 = 31$$

$$a_6 = 63$$

$$a_7 = 127$$

$$a_8 = 255$$

$$a_9 = 511$$

$$a_{10} = 1023$$



# Solución de Torres de Hanoi

Sea  $H_n$  número de movimientos necesarios para resolver el problema con  $n$  discos. Sea  $H_1$  el movimiento de tener un disco.

$$H_n = 2H_{n-1} + 1$$

- 1 Los  $n - 1$  discos de encima se pueden llevar a cualquier torre, realizando  $H_{n-1}$  movimientos.
- 2 Siempre se realizan  $H_{n-1}$  para mover el disco a una torre y  $H_{n-1}$  a la otra

$$H_n = 2H_{n-1} + 1$$

$$H_2 = 2H_1 + 1 = 3$$

$$H_3 = 2H_2 + 1 = 2(3) + 1 = 7$$

$$H_4 = 2H_3 + 1 = 2(7) + 1 = 15$$



# Problemas de cadenas con relación de recurrencia

## Definición

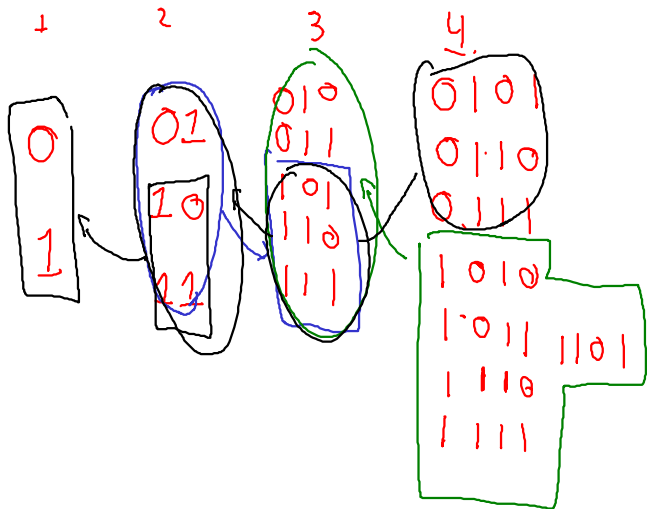
Encuentre una relación de recurrencia y condiciones iniciales para el número de cadenas de  $n$  bits que **NO** contienen dos ceros consecutivos. ¿Cuántas cadenas de longitud 4 hay?

Inicialmente,  $a_n$ : Cadenas de  $n$  bits que inician en 1 + Cadenas de  $n$  bits que inician en 0.

Si  $n = 1$ , 0 y 1,  $a_1 = 2$  (cadenas de longitud 1)

Si  $n = 2$ , 01, 10, 11,  $a_2 = 3$  (cadenas de longitud 2)

Si  $n = 3$



$$Q_n = Q_{n-1} + Q_{n-2}$$

$$Q_1 = 2$$

$$Q_2 = 3$$

# Problemas de cadenas con relación de recurrencia

- 1 Tomamos las cadenas de  $n - 1$  bits y le añadimos un 1 al principio, sea  $n - 1 = 2$ , es decir, 01, 10, 11 y le agregamos 1, 011, 101, 111
- 2 Tomamos las cadenas de  $n - 2 = 1$  bits y le añadimos un 10 al principio, entonces 010, 110. Por lo tanto tenemos que  $a_3 = 5$ , es decir,  $a_3 = a_2 + a_1 = 3 + 2 = 5$

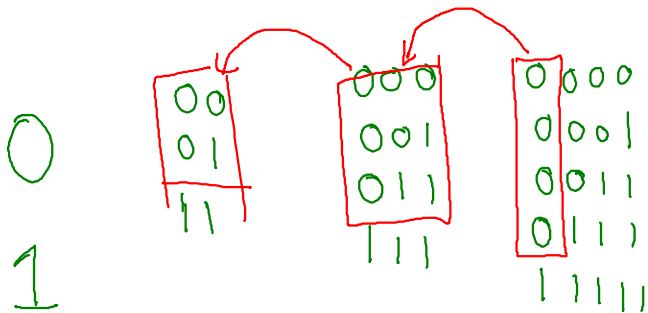
En general,

$$a_n = a_{n-1} + a_{n-2} \quad \text{para } n \geq 3$$

$a_{n-1}$ : cadenas de  $n - 1$  bits que inician en 1.

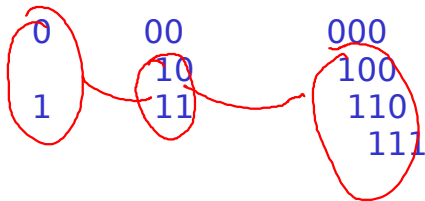
$a_{n-2}$ : cadenas de  $n - 2$  bits que inician en 0.

Cadenas de bits que NO tienen 10 seguidos



$$a_n = a_{n-1} + 1$$

Cadenas de bits que no tienen 01.



$$q_n = q_{n-1} + 1$$

1 Introducción a las recurrencias

2 Recurrencias lineales homogéneas

# Recurrencias lineales homogéneas

$$T(n) = 3T(n-1) + 4T(n-2)$$

## Recurrencias lineales y homogéneas con coeficientes constantes

Una relación lineal, homogénea con coeficientes constantes es de la forma:

$$a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2} + \dots + c_k a_{n-k} \quad \text{Homogénea de orden } k$$

donde  $c_1, c_2, \dots, c_k$  son constantes reales y  $c_k \neq 0$

# Recurrencias lineales homogéneas

$$q_n = c_1 q_{n-1} + c_2 q_{n-2} + \dots + c_k q_{n-k}$$

## Recurrencias lineales y homogéneas con coeficientes constantes

Para resolver la R.R suponemos una solución  $a_n = r^n$ ,  $r$  constante.

$a_n = r^n$  es solución de  $a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2} + \dots + c_k a_{n-k}$  **sii**

$$r^n = c_1 r^{n-1} + c_2 r^{n-2} + \dots + c_k r^{n-k} \quad (1)$$



# Recurrencias lineales homogéneas

$$r^n = c_1 r^{n-1} + c_2 r^{n-2} + \dots + c_k r^{n-k} \quad (2)$$

Dividimos por  $r^{n-k}$

$$\frac{r^n}{r^{n-k}} = \frac{c_1 r^{n-1}}{r^{n-k}} + \frac{c_2 r^{n-2}}{r^{n-k}} + \dots + \frac{c_k r^{n-k}}{r^{n-k}} \quad \text{con } \frac{1}{r^{(n-k)-(n-k)}}$$

Planteamos la ecuación característica:

$$r^k = c_1 r^{k-1} + c_2 r^{k-2} + \dots + c_{k-1} r + c_k \quad (3)$$

$$r^k - c_1 r^{k-1} - c_2 r^{k-2} - \dots - c_{k-1} r - c_k = 0 \quad (4)$$

$a_n = r^n$  es solución **sii**  $r$  es solución de (4)

$$a_n = 3a_{n-1} + 4a_{n-2} \quad a_n = r^n$$

$$\frac{r^{n-1}}{r^{n-2}} = (n-1) - (n-2) = 1$$

$$r^n = 3r^{n-1} + 4r^{n-2}$$

$$\frac{r^n}{r^{n-2}} = \frac{3r^{n-1}}{r^{n-2}} + \frac{4r^{n-2}}{r^{n-2}}$$

$$r^2 = 3r + 4 \longrightarrow r^2 - 3r - 4 = 0$$

Equation characteristic

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} =$$

$$\frac{3 \pm \sqrt{9 + 16}}{2} = \frac{3 \pm 5}{2} \begin{cases} r_1 = 4 \\ r_2 = -1 \end{cases}$$

$$a_n = \alpha_1 (4)^n + \alpha_2 (-1)^n \} \text{ Solución general}$$

# Recurrencias lineales homogéneas

## Teorema

*Sean  $c_1$  y  $c_2$  reales, supongamos que  $r^2 - c_1r - c_2 = 0$  tiene dos raíces reales distintas  $r_1$  y  $r_2$ . Entonces la sucesión  $\{a_n\}$  es una solución de la recurrencia  $a_n = c_1a_{n-1} + c_2a_{n-2}$  sii  $a_n = \alpha_1 r_1^n + \alpha_2 r_2^n$ , para  $n = 0, 1, 2$  donde  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son constantes.*

$$a_n = \alpha_1 r_1^n + \alpha_2 r_2^n$$

$$a_n = a_{n-1} + 2a_{n-2}$$

$$a_0 = 2$$

$$\left. \begin{array}{l} ? \\ n=0 \end{array} \right\}$$

$$a_1 = 7$$

$$\left. \begin{array}{l} ? \\ n=1 \end{array} \right\}$$

$$\frac{r^n}{r^{n-1}} = \frac{r^{n-1} + 2r^{n-2}}{r^{n-2}} \Rightarrow r^2 = r + 2 \rightarrow r^2 - r - 2 = 0$$

$$\frac{1 \pm \sqrt{1+8}}{2} \rightarrow \frac{1 \pm 3}{2} \begin{cases} r_1 = 2 \\ r_2 = -1 \end{cases}$$

$$a_n = A(2)^n + B(-1)^n$$

$$n=0 \rightsquigarrow 2 = A + B$$

$$9 = 3A \quad A = 3$$

$$n=1 \rightsquigarrow 7 = 2A - B$$

$$2 = 3 + B \quad B = -1$$

$$a_n = 3(2)^n + (-1)^n$$

n	$a_n^*$	$a_n$
0	2	✓
1	7	✓
2	11	✓
3	25	✓

$$a_n = a_{n-1} + 2a_{n-2}$$

$$a_2 = a_1 + 2a_0 = 11$$

$$a_3 = a_2 + 2a_1 = 25$$

$$a_n = 6a_{n-1} + 7a_{n-2}$$

$$a_0 = 2 \quad a_1 = 11$$

$$a_0 = 2 \quad a_1 = 11$$

$$a_n = 6a_{n-1} + 7a_{n-2}$$

$$a_n = 6a_{n-1} + 7a_{n-2}$$

$$\frac{r^n}{r^{n-2}} = \frac{6r^{n-1}}{r^{n-2}} + \frac{7r^{n-2}}{r^{n-2}}$$

$$r^2 = 6r + 7$$

$$r^2 - 6r - 7 = 0$$

E.C

$$a_n = A(7)^n + B(1)^n$$

$$2 = A + B$$

$$11 = 7A - B$$

$$13 = 8A$$

$$A = 13/8$$

$$11 = 7(13/8) - B$$

$$11 = 91/8 - B$$

$$11 + B = 91/8$$

$$B = 3/8$$

# Recurrencias lineales homogéneas

Obtener la ecuación característica y solución de la recurrencia  $a_n = a_{n-1} + 2a_{n-2}$  para  $a_0 = 2$  y  $a_1 = 7$

- 1 La ecuación característica  $r^2 - r - 2 = 0$  cuyas raíces son  $r_1 = 2$  y  $r_2 = -1$ . Así **Por teorema**, la secuencia  $\{a_n\}$  es la solución de la recurrencia **sii**

$$a_n = \alpha_1 2^n + \alpha_2 (-1)^n$$

Resolviendo las ecuaciones:

$$a_0 = 2 = \alpha_1 + \alpha_2$$

$$a_1 = 7 = \alpha_1 \cdot 2 + \alpha_2 \cdot (-1)$$

# Recurrencias lineales homogéneas

Obtener la ecuación característica y solución de la recurrencia

$$a_n = a_{n-1} + 2a_{n-2} \text{ para } a_0 = 2 \text{ y } a_1 = 7$$

- 2** Entonces  $\alpha_1 = 3$  y  $\alpha_2 = -1$  por lo tanto la solución de la recurrencia es la secuencia  $\{a_n\}$

$$a_n = 3 \cdot 2^n - (-1)^n$$

# Recurrencias lineales homogéneas

## Resolver la relación de recurrencia de fibonacci

$f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$ , para  $f_0 = 0$  y  $f_1 = 1$  por tanto la ecuación característica  $r^2 - r - 1 = 0$  cuyas raíces son:  $r_1 = (1 + \sqrt{5})/2$  y  $r_2 = (1 - \sqrt{5})/2$  por lo tanto por teorema:

$$f_n = \alpha_1 \left( \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^n + \alpha_2 \left( \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^n$$

Para algunas constantes  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  y las condiciones iniciales  $f_0 = 0$  y  $f_1 = 1$

$$f_0 = \alpha_1 + \alpha_2 = 0$$

$$f_1 = \alpha_1 \left( \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right) + \alpha_2 \left( \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right) = 1$$



# Recurrencias lineales homogéneas

## Resolver la relación de recurrencia de fibonacci

La solución de las ecuación  $\alpha_1 = 1/\sqrt{5}$  y  $\alpha_2 = -1/\sqrt{5}$ , por tanto una **fórmula explícita de Fibonacci**:

$$f_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^n - \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^n$$

# Recurrencias lineales homogéneas

**Resolver la recurrencia**  $a_{n+2} = -4a_{n+1} + 5a_n$  para  $n \geq 0$ ,  
 $a_0 = 2$  y  $a_1 = 8$

1 Sea  $a_{n+2} = r^{n+2}$  para  $n \geq 0$  por tanto se obtiene la ecuación característica  $r^2 + 4r - 5 = (r + 5)(r - 1) = 0$  cuyas raíces  $r_1 = -5$  y  $r_2 = 1$

2 La sucesión  $\{a_n\}$  es solución de la recurrencia:

$$a_n = \alpha_1(-5)^n + \alpha_2(1)^n$$

3 Por tanto el sistema de ecuaciones para obtener  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$

$$a_0 = 2 = \alpha_1 + \alpha_2$$

$$a_1 = 8 = \alpha_1(-5) + \alpha_2$$

$$\text{Entonces } \alpha_1 = -1 \text{ y } \alpha_2 = 3$$
$$a_n = 3(1)^n - (-5)^n$$

# Recurrencias lineales homogéneas

## Teorema 2

Sean  $c_1$  y  $c_2$  reales con  $c_2 \neq 0$ , supongamos que  $r^2 - c_1r - c_2 = 0$  tiene una sola raíz  $r_0$ . Una secuencia  $\{a_n\}$  es una solución de la recurrencia  $a_n = c_1a_{n-1} + c_2a_{n-2}$  **sii**  $a_n = \alpha_1 r_0^n + \alpha_2 n r_0^n$ , para  $n = 0, 1, 2$  donde  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son constantes.

$$a_n = 6a_{n-1} - 9a_{n-2}$$

$$a_0 = 1 \quad a_1 = 6$$

$$r^n = 6r^{n-1} - 9r^{n-2}$$

$$r^2 - 6r + 9 = 0$$

$$\frac{6 \pm \sqrt{36 - 36}}{2} = \textcircled{r=3}$$

$$a_n = A3^n + Bn3^n$$

$$1 = A$$

$$6 = 3A + 3B \quad B = 1$$

$$a_n = 3^n + n3^n$$

n	$a_n^*$	$a_n$
0	1	✓
1	6	✓
2	27	✓
3	108	✓

# Recurrencias lineales homogéneas

**Solucionar la recurrencia**  $a_n = 6a_{n-1} - 9a_{n-2}$  y condiciones iniciales  $a_0 = 1$  y  $a_1 = 6$

- 1 Entonces  $r^2 - 6r + 9 = 0$ ,  $(r - 3)^2 = 0$  tiene como única raíz  $r = 3$ .
- 2 La solución de la recurrencia por **teorema 2** es:

$$a_n = \alpha_1 3^n + \alpha_2 n 3^n$$

- 3 Usando los valores iniciales calculamos:

$$a_0 = 1 = \alpha_1$$

$$a_1 = 6 = \alpha_1 \cdot 3 + \alpha_2 \cdot 3$$

Entonces  $\alpha_1 = 1$  y  $\alpha_2 = 1$

$$a_n = 3^n + n 3^n$$

$$Q_n = 4Q_{n-1} - 4Q_{n-2}$$

$$Q_0 = 2$$

$$Q_1 = 8$$

$$Q_0 = 2 \quad Q_1 = 8$$

$$Q_n = 4Q_{n-1} - 4Q_{n-2} \sim$$

$$a_2 = 4 \cdot 8 - 4 \cdot 2$$

$$a_2 = 24$$

$$r^2 - 4r + 4 = 0$$

$$\frac{4 \pm \sqrt{0}}{2} = 2$$

$$Q_n = 2(2)^n + 2n(2)^{n-1}$$

$$a_0 = 2 \checkmark$$

$$a_1 = 8$$

$$Q_n = A(2)^n + Bn(2)^n$$

$$a_0 = 2 = A$$

$$a_1 = 8 = 2(2) + 2B$$

$$8 = 4 + 2B$$

$$\frac{8-4}{2} = B \quad \boxed{B=2}$$

$$a_2 = 2(4) + 4(4)$$

$$\checkmark 24$$

# Recurrencias lineales homogéneas

## Teorema 3

Sean  $c_1, c_2, \dots, c_k$  reales. Supongamos la ecuación característica

$$r^k - c_1 r^{k-1} - \dots - c_k = 0$$

Con  $k$  **raíces distintas**  $r_1, r_2, \dots, r_k$ . Entonces la secuencia  $\{a_n\}$  es una solución de la recurrencia

$$a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2} + \dots + c_k a_{n-k}$$

**sii** 
$$a_n = \alpha_1 r_1^n + \alpha_2 r_2^n + \dots + \alpha_k r_k^n$$

Para  $n = 0, 1, 2, \dots$  donde  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$  son constantes.

# Recurrencias lineales homogéneas

$$r^3 - 6r^2 + 11r - 6 = 0$$

**Encontrar la solución de**  $a_n = 6a_{n-1} - 11a_{n-2} + 6a_{n-3}$ , con condiciones iniciales,  $a_0 = 2, a_1 = 5$  y  $a_2 = 15$

- 1 La ecuación característica  $r^3 - 6r^2 + 11r - 6 = 0$  cuyas raíces son  $r_1 = 1, r_2 = 2$  y  $r_3 = 3$ , porque  $r^3 - 6r^2 + 11r - 6 = (r - 1)(r - 2)(r - 3)$
- 2 La solución de la recurrencia:

$$a_n = \alpha_1 \cdot 1^n + \alpha_2 \cdot 2^n + \alpha_3 \cdot 3^n$$

Por tanto las constantes deben ser calculadas

$$\begin{aligned} a_0 = 2 &= \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3, \\ a_1 = 5 &= \alpha_1 + \alpha_2 \cdot 2 + \alpha_3 \cdot 3, \\ a_2 = 15 &= \alpha_1 + \alpha_2 \cdot 4 + \alpha_3 \cdot 9 \end{aligned}$$



# Recurrencias lineales homogéneas

$$r^3 - 6r^2 + 11r - 6 = 0$$

**Encontrar la solución** de  $a_n = 6a_{n-1} - 11a_{n-2} + 6a_{n-3}$ , con condiciones iniciales,  $a_0 = 2$ ,  $a_1 = 5$  y  $a_2 = 15$

- 3** Resolviendo el sistema de ecuaciones,  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = -1$  y  $\alpha_3 = 2$ , Por lo tanto la **única solución** de la recurrencia es la secuencia  $\{a_n\}$  con

$$a_n = 1 - 2^n + 2 \cdot 3^n$$

# Recurrencias lineales homogéneas

## Teorema 4

Sean  $c_1, c_2, \dots, c_k$  reales. Supongamos la ecuación característica

$$r^k - c_1 r^{k-1} - \dots - c_k = 0$$

Con  $t$  **raíces distintas**  $r_1, r_2, \dots, r_t$  con multiplicidad  $m_1, m_2, \dots, m_t$  respectivamente, así que  $m_i \geq 1$ , para  $i = 1, 2, \dots, t$  y  $m_1 + m_2 + \dots + m_t = k$  Entonces la secuencia  $\{a_n\}$  es una solución de la recurrencia

$$a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2} + \dots + c_k a_{n-k}$$

sii

$$\begin{aligned} a_n = & (\alpha_{1,0} + \alpha_{1,1}n + \dots + \alpha_{1,m_1-1}n^{m_1-1})r_1^n + \\ & (\alpha_{2,0} + \alpha_{2,1}n + \dots + \alpha_{2,m_2-1}n^{m_2-1})r_2^n + \dots + \\ & (\alpha_{t,0} + \alpha_{t,1}n + \dots + \alpha_{t,m_t-1}n^{m_t-1})r_t^n \end{aligned}$$

Para  $n = 0, 1, 2, \dots$  donde  $\alpha_{i,j}$  son constantes para  $1 \leq i \leq t$  y  $0 \leq j \leq m_i - 1$

# Recurrencias lineales homogéneas

Supongamos que las raíces de la ecuación característica son  $2, 2, 2, 5, 5$  y  $9$  que forma tiene la solución general.

- 1 Hay tres raíces distintas.
- 2 Raíz 2 con multiplicidad 3, Raíz 5 con multiplicidad 2 y la raíz 9 con multiplicidad 1.
- 3 Solución

$$a_n = (\alpha_{1,0} + \alpha_{1,1}n + \alpha_{1,2}n^2)2^n + (\alpha_{2,0} + \alpha_{2,1}n)5^n + \alpha_{3,0}9^n$$

3, 3, 3, 9, 9, 2, 2

$$Q_n = A3^n + Bn3^n + Cn^2 3^n + \\ D9^n + E_n9^n + \\ F2^n + G_n2^n$$

# Recurrencias lineales homogéneas

## Encontrar la solución la recurrencia

$$a_n = -3a_{n-1} - 3a_{n-2} - a_{n-3}$$

$$r^3 + 3r^2 + 3r + 1 = 0$$

Con  $a_0 = 1$ ,  $a_1 = -2$  y  $a_2 = -1$ , la ecuación característica de la recurrencia es :

$$r^3 + 3r^2 + 3r + 1 = (r + 1)^3$$

$$r = -1$$

Hay una sola raíz  $r = -1$  de multiplicidad 3. Por lo tanto la solución de la recurrencia es:

$$a_n = \alpha_{1,0}(-1)^n + \alpha_{1,1}n(-1)^n + \alpha_{1,2}n^2(-1)^n$$

$$a_n = A(-1)^n + Bn(-1)^n + Cn^2(-1)^n$$

$$a_0 = 1 = \alpha_{1,0}$$

$$a_1 = -2 = -\alpha_{1,0} - \alpha_{1,1} - \alpha_{1,2},$$

$$a_2 = -1 = \alpha_{1,0} + 2\alpha_{1,1} + 4\alpha_{1,2}$$

Entonces  $\alpha_{1,0} = 1$ ,  $\alpha_{1,1} = 3$  y  $\alpha_{1,2} = -2$ , la única solución es la secuencia  $\{a_n\}$

$$a_n = (1 + 3n - 2n^2)(-1)^n$$

$$2, 2, 3, 3, 3$$

$$Q_0=1 \quad Q_1=2 \quad Q_2=5$$

$$Q_3=8 \quad Q_4=18$$

$$Q_n = A2^n + Bn2^n + C3^n + Dn3^n + En^23^n$$

$$n=0 \quad 1 = A + C$$

$$n=1 \quad 2 = 2A + 2B + 3C + 3D + 3E$$

$$n=2 \quad 5 = 4A + 8B + 9C + 18D + 36E$$

$$n=3 \quad 8 = 8A + 24B + 27C + 81D + 243E$$

$$n=4 \quad 18 = 16A + 64B + 81C + 324D + 1296E$$



Kenneth H. Rosen.

*Discrete Mathematics and Its Applications.*

McGraw-Hill Higher Education, 7th edition, 2011.

Chapter 8. Advanced Counting Techniques.

# Gracias

Próximo tema:  
Recurrencias no homogéneas