SEGURIDAD DE LA INFORMACIÓN

TEMA 2

TÉCNICAS CRIPTOGRÁFICAS BÁSICAS

(Y SERVICIOS DE SEGURIDAD ASOCIADOS)

Indice del tema (I)

- Introducción a la criptografía clásica
  - Cifrados por sustitución y transposición. Ejemplos
  - Cifrado producto
  - Cifrado Vernam (one-time pad)
- Algoritmos simétricos
  - Fundamentos
  - Algoritmo DES
  - Algoritmo triple-DES
  - Algoritmo AES
  - Otros algoritmos simétricos
  - Modos de operación para algoritmos simétricos
  - Ventajas y desventajas de los algoritmos simétricos

Indice del tema (II)

- Algoritmos asimétricos (o de clave pública)
  - Cifrado/descifrado
  - Firma Digital
  - Intercambio de Claves
  - Algoritmo de Diffie-Hellman
  - Algoritmo RSA
- Otras primitivas criptográficas
  - Funciones hash
  - Códigos de autenticación de mensajes
- Referencias bibliográficas

Introducción a la criptografía clásica

Cifrados por sustitución y transposición. Ejemplos

- Como se ha visto en la última tabla del capítulo anterior, un algoritmo de cifrado es uno de los mecanismos para la implementación de servicios de seguridad
- Criptografía: ciencia que estudia cómo mantener la seguridad en los mensajes (M)
  - usando, entre otros mecanismos, los algoritmos de cifrado
- Criptoanálisis: ciencia que estudia cómo romper los textos cifrados
- Criptología: Criptografía + Criptoanálisis

- El algoritmo de cifrado es un mecanismo que transforma un texto en claro en texto ininteligible
  - Su objetivo es dar cobertura al servicio de Confidencialidad
  - El algoritmo de cifrado se denota por E (del inglés "encrypt") y opera sobre el texto en claro *M* (mensaje)
    para producir el texto cifrado *C* (criptograma)

$$E(M) = C$$

- La transformación inversa, o sea, de un texto cifrado en un texto en claro, se denomina algoritmo de descifrado
  - El algoritmo de descifrado se denota por D ("decrypt")

    opera sobre *C* para producir el mensaje *M*

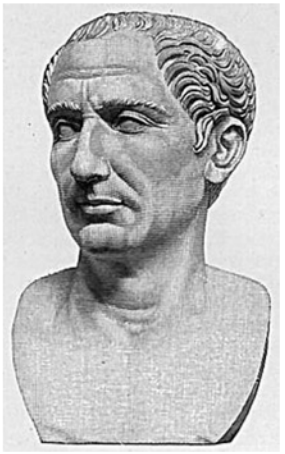
$$D(C) = M$$

- Se cumple que:

$$D(E(M)) = M$$

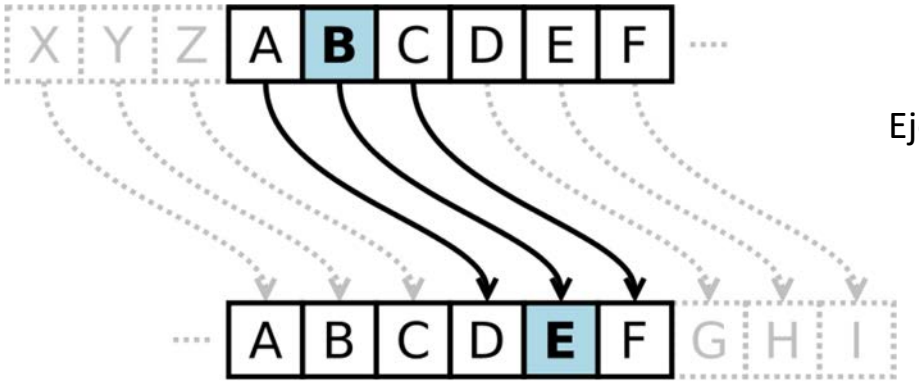
- Antes de la existencia de ordenadores, la criptografía clásica consistía en algoritmos basados en caracteres
- Los algoritmos criptográficos clásicos o bien sustituían caracteres o bien los transponían
  - Cifrado por sustitución:
    - cifrado en el que cada carácter del texto en claro se sustituye por otro carácter en el texto cifrado
      - A→ V
      - V → W
      - …
  - Cifrado por transposición:
    - consiste en realizar una permutación de las posiciones que ocupan los símbolos en el mensaje en claro
      - HOLA → ALHO

Ejemplo: cifrado por sustitución César



- Consiste en una transformación única. Cada carácter de texto en claro se reemplaza por el carácter tercero a la derecha, módulo 27

$$C: M \rightarrow M + 3 \ (mod.\ 27)$$



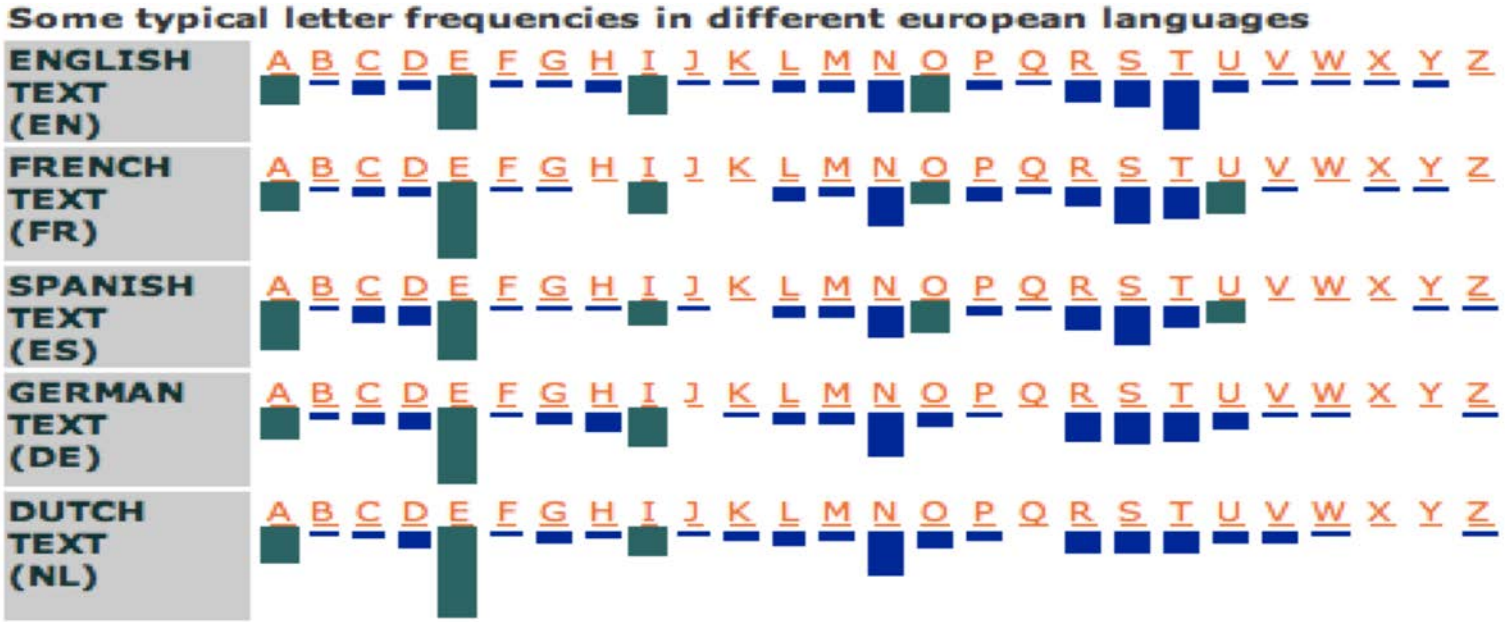
Ejemplo texto cifrado: WX WDPELHQ, EUXWR, KLMR PLR

¿Cómo sería el descifrado de este texto cifrado?

- Generalizado después a un sistema de cifrado con 27 posibles combinaciones

$$C: M \rightarrow M + \mathrm{i} \ (\mathrm{mod.}\ 27) \qquad 1 \leq \mathrm{i} \leq 27$$

- Ese algoritmo da ventaja al criptoanalista, porque la frecuencia de aparición de las letras es bien conocida. Así:



English

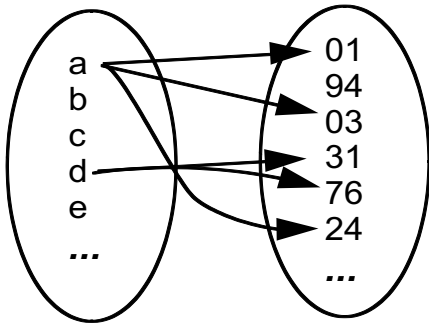
E	12.4%	H	6.5%	U	2.7%	G	2.0%	K	0.7%
T	8.9%	S	6.2%	M	2.5%	Y	2.0%	Q	0.1%
A	8.0%	R	6.1%	W	2.3%	P	1.6%	X	0.1%
O	7.6%	D	4.6%	C	2.2%	B	1.3%	J	0.1%
N	7.0%	L	3.6%	F	2.2%	V	0.8%	Z	0.0%
I	6.7%								

Spanish

E	13.0%	S	6.9%	U	3.6%	V	1.0%	J	0.3%
A	11.1%	T	5.3%	P	3.0%	F	0.8%	Z	0.3%
O	9.7%	C	5.2%	M	2.9%	Y	0.7%	X	0.2%
I	8.2%	D	4.5%	G	1.4%	H	0.6%	W	0.1%
N	8.0%	L	3.6%	B	1.3%	Q	0.6%	K	0.0%
R	7.7%								

Ejemplo: cifrado por sustitución homofónico

- Se basa en la idea de asignar a un símbolo del alfabeto fuente varios del alfabeto cifrado, solventando el problema de la frecuencia de letras
- Correspondencia uno a muchos ⇒ al cifrar un mensaje podemos obtener varios criptogramas



- Ejemplo:

Letra	% (redondeado)	Símbolos asignados
A	8	10, 11, 23, 45, 76, 79, 87, 98
L	6	02, 15, 21, 25, 56, 60
N	3	44, 63, 71
O	8	04, 16, 28, 29, 37, 52, 69, 90
P	2	30, 88
T	2	24, 77

"PLATON" se cifra como "882110772963"

Ejemplo: cifrado por sustitución polialfabética

[Intipedia]

- Alfabeto para posiciones impares:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
V	K	L	s	w	e	M	N	U	f	a	b	Q	r	S	t	o	j	I	P	x	s	Ñ	h		d	Z	W

- Alfabeto para posiciones pares:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
z	g	X	Y	a	b	D	K	L	P	q	s	t	U	O	Ñ	Q	k	e	c	H	W	M	N	f	g	i

- Cifrado del texto: "***HOLA A TODOS***"

H	O	L	A	A	T	O	D	O	S

- Descifrado:

Ejemplo: cifrado por sustitución polialfabética

[Intipedia]

- Alfabeto para posiciones impares:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
V	K	L	s	w	e	M	N	U	f	a	b	Q	r	S	t	o	j	I	P	x	s	Ñ	h		d	Z	W

- Alfabeto para posiciones pares:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
z	g	X	Y	a	b	D	K	L	P	q	s	t	U	O	Ñ	Q	k	e	c	H	W	M	N	f	g	i

- Cifrado del texto: "***HOLA A TODOS***"

H	O	L	A	A	T	O	D	O	S
N	Ñ	b	z	V	H	t	Y	t	c

- Descifrado:

N	Ñ	b	z	V	H	t	Y	t	c
H	O	L	A	A	T	O	D	O	S

Ejemplo: cifrado por transposición

- La forma más simple de transposición: el texto en claro se escribe como secuencia de filas (con una cierta profundidad) y se lee como secuencia de columnas
- Ejemplo: "EN ANDALUCIA, EL MULHACEN Y EL VELETA, SON LAS MONTAÑAS MAS ALTAS"

ENANDALUCIAELMULHACENYELVE

LETASONLASMONTAÑASMASALTAS

- Mensaje cifrado:

ELNEATNADSAOLNULCAISAMEOLNMTUALÑHAASCMEANSYAELLTVAES

Ejemplo: cifrado por transposición con clave

[Intipedia]

- Se podría complicar el procedimiento anterior estableciendo una restricción en el número de columnas cuyo valor va a depender del tamaño que tenga una **clave**
- Ejemplo:
  - Texto en claro: "***HOLA A TODOS, QUE TENGÁIS UN BUEN DÍA***"
  - Clave: "**SECRETO**" con un tamaño de 7

S	E	C	R	E	T	O
H	O	L	A	A	T	O
D	O	S	Q	U	E	T
E	N	G	A	I	S	U
N	B	U	N	D	I	A

- Para el cifrado se puede poner la condición siguiente: se va a ir cogiendo las letras de aquellas columnas por orden alfabético del secreto, es decir: **C, E, E, O, R, S, T**, resultando en: "_____"

Ejemplo: cifrado por transposición con clave

[Intipedia]

- Se podría complicar el procedimiento anterior estableciendo una restricción en el número de columnas cuyo valor va a depender del tamaño que tenga una **clave**
- Ejemplo:
  - Texto en claro: "***HOLA A TODOS, QUE TENGÁIS UN BUEN DÍA***"
  - Clave: "**SECRETO**" con un tamaño de 7

S	E	C	R	E	T	O
H	O	L	A	A	T	O
D	O	S	Q	U	E	T
E	N	G	A	I	S	U
N	B	U	N	D	I	A

- Para el cifrado se puede poner la condición siguiente: se va a ir cogiendo las letras de aquellas columnas por orden alfabético del secreto, es decir: **C, E, E, O, R, S, T**, resultando en: "LSGUOONBAUIDOTUAAQANHDENTESI"

Ejemplo: cifrado por transposición Railfence

- El cifrado consiste
  - en escribir diagonalmente el texto en claro con una profundidad P específica
  - el criptograma se escribe leyendo las filas

- Ejemplo: M = “Hola a todos”, con una profundidad de P=4, entonces el criptograma es: **Hoot d laoas**

por simplemente computar:

```
H     o
 o   t d
  l a   o
   a     s
```

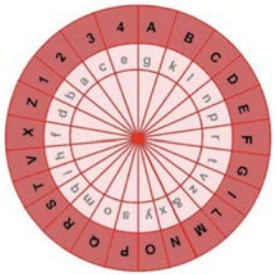
Ejemplo: métodos polialfabéticos y nomenclátores

[Intipedia]

- Para complicar el proceso de cifrado, se puede hacer uso del disco de Alberti junto con nomenclátores, los cuales consisten en asociar a determinados palabras, códigos específicos

Felipe II	123
Rey	124
Walshingan	122

- Se desea descifrar el siguiente texto: "***baa&hpmiyvsvoiylrlxckngkl***"
- Uso del disco:
  - Cada diez letras descifradas, se ha de girar el disco externo (de las mayúsculas) dos posiciones en el sentido de las agujas del reloj
  - En el disco de Alberti, la **u** se identifica con la **v** al cifrar. Al descifrar, por el sentido de la frase, se puede conocer si se ha de escribir una u otra letra

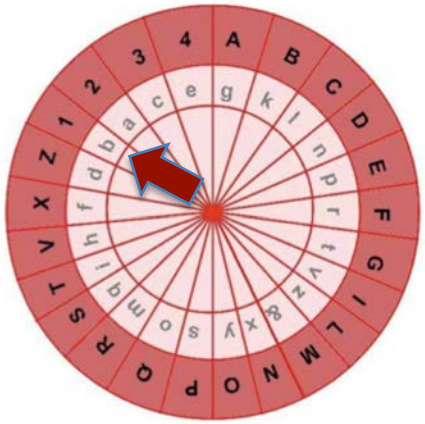


Ejemplo: métodos polialfabéticos y nomenclátores

[Intipedia]

- Funcionamiento para cifrar:
  - Posicionar los disco en el estado inicial

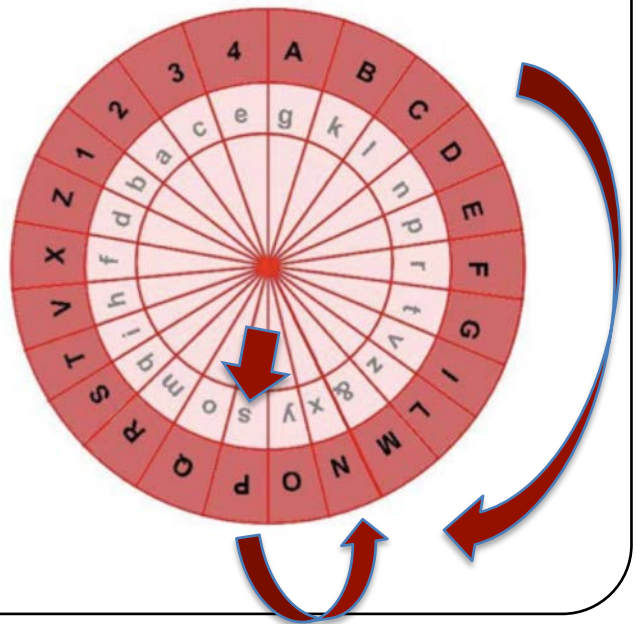
b	a	a	&	H	p	m	i	Y	V
1	2								



*"**baa&hpmiyvsvoiylrlxckngkl**"*

  - Con el disco externo girar 2 posiciones en el sentido de las agujas del reloj (sólo en cada diez letras descifrada):

s	v	o	l	Y	l	r	l	X	C
N	F								



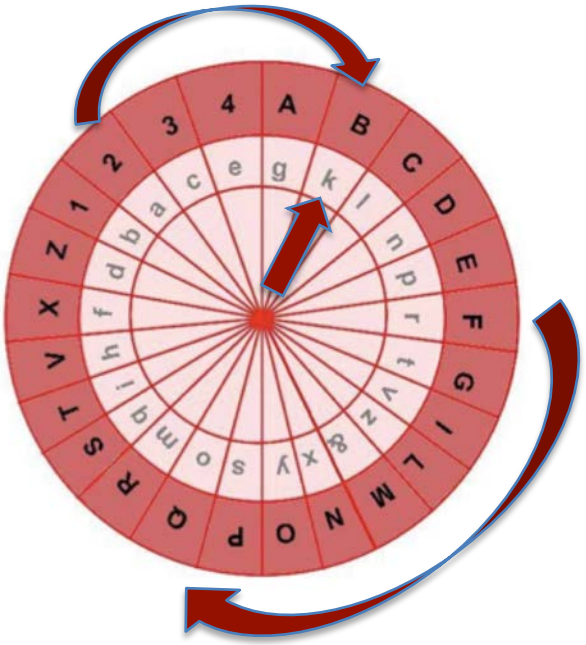
*"**baa&hpmiyvsvoiylrlxckngkl**"*

Ejemplo: métodos polialfabéticos y nomenclátores

[Intipedia]

- Funcionamiento:
  - Con el disco externo volver a girar 2 posiciones en el sentido de las agujas del reloj:

k	n	g	k	L
2	4	1	2	3



*"**baa&hpmiyvsvoiylrlxckngkl**"*

  - Por consiguiente, el texto en claro es:

b	a	a	&	H	p	m	i	Y	V
1	2	2	M	V	E	R	T	O	I

s	v	o	l	Y	l	r	l	X	C
N	F	O	R	M	A	D	A	L	1

k	n	g	k	L
2	4	1	2	3

"1 2 2 M V E R T O I N F O R M A D A L 1 2 4 1 2 3"

  - Si, además, añadimos los nomenclátores + la restricción de la V → U:

Felipe II	123
Rey	124
Walshingan	122

"WALSHINGAN MUERTO INFORMAD AL REY FELIPE II"

Cifrado Producto

- Combina sustitución y transposición
- Se pueden considerar como la aplicación sucesiva de varios cifrados E_i

$$E = E_1 \,.\, E_2 \,.\, \cdots \,.\, E_r$$

$$E\,(M) = E_1\,(E_2\,(\cdots\,(E_r\,(M))$$

- La composición de funciones de descifrado D_i se realiza en orden inverso

$$D = D_r \cdot D_{r-1} \cdots D_1$$

$$M = D(C) = D_r\,(D_{r-1}\,(\ldots\,(D_1\,(C)))$$

- Es un esquema utilizado para obtener un alto grado de seguridad con sistemas relativamente sencillos aplicados reiterativamente
- Dan lugar a sistemas de cifrado complejos, seguros, difíciles de atacar, fácilmente trasladables a un ordenador

Cifrado Vernam

- Variante del cifrado llamado one-time pad (OTP)
- Un one-time pad es un *conjunto infinito y no repetitivo* de letras aleatorias
- Cada letra del pad se usa para cifrar una única letra del texto en claro, en módulo *n* (longitud del alfabeto)

One-time pad booklet and microdot reader,concealed in a toy truck and used by an illegal agent that operated in Canada. © Canadian Security Intelligence Service

Texto : T H I S I S S E C R E T

OTP: X VHE UW N O P G C Z

Cifrado : QCPW CO F S R X H S

- Otro dos ejemplos:
  - Aquí se observan grupos de tres filas, que se corresponden con texto en claro (en decimal), clave y criptograma

Fuente: *http://www.caslab.cl/che.php*

B	A	R	R	O	Y	C	A	Ñ	A	B	R	A	V	A	← MCla
1	0	18	18	15	25	2	0	14	0	1	18	0	22	0	
E	D	S	A	S	A	C	E	T	N	I	E	V	E	D	← Clave (tan larga como el mensaje)
4	3	19	0	19	0	2	4	20	13	8	4	22	4	3	
5	3	10	18	7	25	4	4	7	13	9	22	22	26	3	← MCla + Clave
F	D	K	R	H	Y	E	E	H	N	J	V	V	Z	D	← Criptograma

Fuente: *http://bit.ly/2cqBu8D*

Cifrado: (carácter del texto en claro + key) + mod 27

Descifrado: (carácter del criptograma - key) + mod 27

- En los ordenadores, el OTP aleatorio de longitud infinita se combina mediante XOR con el texto en claro. Ejemplo:

Texto en claro	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	⊕
OTP	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	=
Criptograma	**0**	**1**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	**1**	**0**	**1**	**1**	**1**	**0**	**1**	**0**	**1**	**0**	**0**	**1**	⊕
OTP	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	=
Texto en claro	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	

- Inconvenientes del cifrado Vernam:
  - las letras del OTP (o bits si se usa en ordenador) han de generarse aleatoriamente
  - el OTP no se vuelve a usar

Relación de ejercicios

1. Considerando el alfabeto común (incluyendo la ñ en el alfabeto) y un desplazamiento de 3 posiciones para el proceso de cifrado o descifrado, aplicar la técnica de sustitución Caesar para cifrar el siguiente texto:

   "EL PATIO DE MI CASA ES PARTICULAR"

   Nota: se empieza a contar desde la posición 1 (A del alfabeto)

SOLUCIÓN: HÑ SDWLR GH OL FDVD HV SDUWLFXÑDU

Relación de ejercicios

2. Dado el criptograma C = “FMIRZIRMHS E PE EWMKREXYVE HI WIKYVMHEH HI PE MRJSVQEGMKR” descifrar el contenido del mismo, sabiendo, además, que hay que usar la técnica de sustitución Caesar con un desplazamiento de 4 posiciones modulo n=26

   Nota: se empieza a contar desde la posición 1 (A del alfabeto)

SOLUCIÓN: BIENVENIDO A LA ASIGNATURA DE SEGURIDAD DE LA INFORMACIÓN

Relación de ejercicios

3. El siguiente algoritmo aplicará una sustitución monoalfabética, pero esta vez teniendo en cuenta la siguiente regla: $C_i = M_i + K_i \bmod 26$ donde K representa una clave de longitud L. El objetivo es cifrar el texto original usando el alfabeto inglés

   ¿Cuál sería el criptograma del mensaje M = "HOLA AMIGOS" usando una clave K = CIFRA?

   Nota: se empieza a contar desde la posición 1 (A del alfabeto)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26

H	O	L	A	A	M	I	G	O	S
8	16	12	1	1	13	9	7	15	19
C	***I***	***F***	***R***	***A***	***C***	***I***	***F***	***R***	***A***
+3	+8	+6	+18	+1	+3	+9	+6	+18	+1
K	**X**	**R**	**S**	**B**	**P**	**R**	**M**	**G**	**T**
11	24	17	19	2	16	18	13	32→7	20

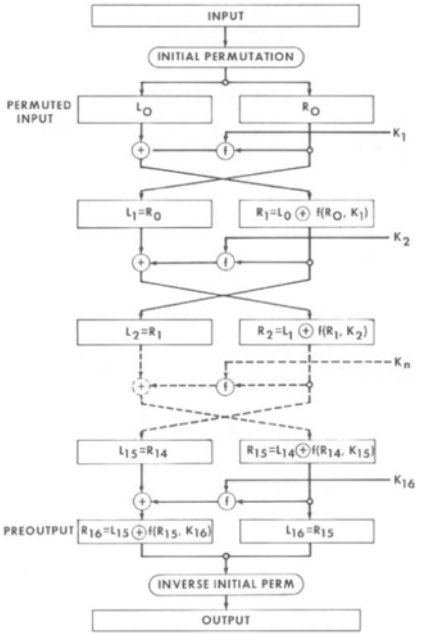
SOLUCIÓN: KXRS BPRMGT

Relación de ejercicios

4. Mediante la técnica Railfence, determinar el criptograma correspondiente al mensaje "*El perro de San Roque no tiene rabo porque Ramón Ramírez se lo ha robado*" con una profundidad P=7 (alfabeto inglés)

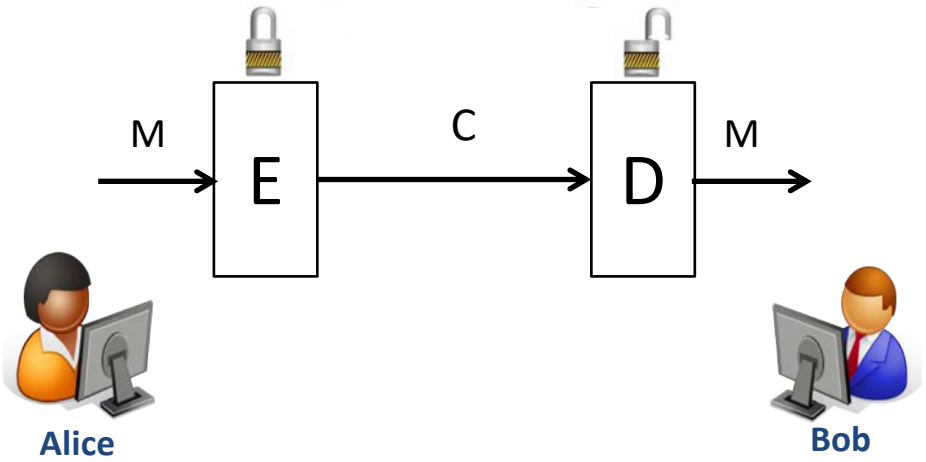
SOLUCIÓN: ER rmhln oe aan oapaq nb RRlre Sueo eaeore eipóu msbírdn to qr za ooored

Algoritmos simétricos

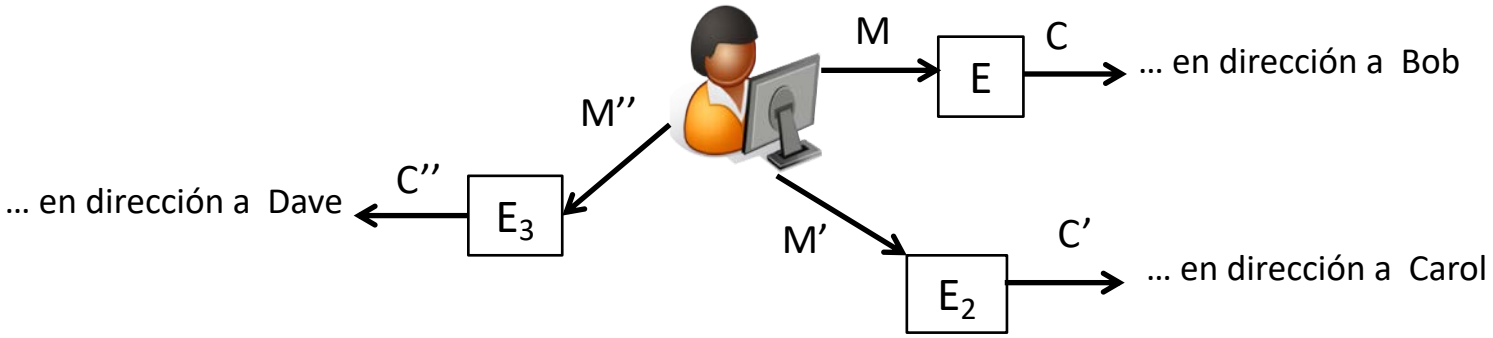


Fundamentos

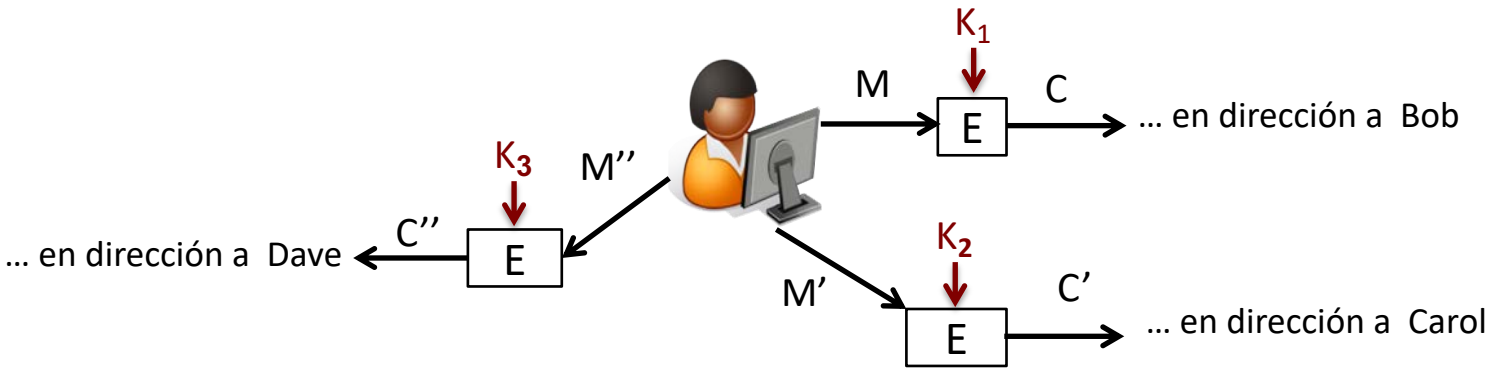
- En la mayoría de los ejemplos de la sección anterior la comunicación entre los usuarios puede representarse como sigue:



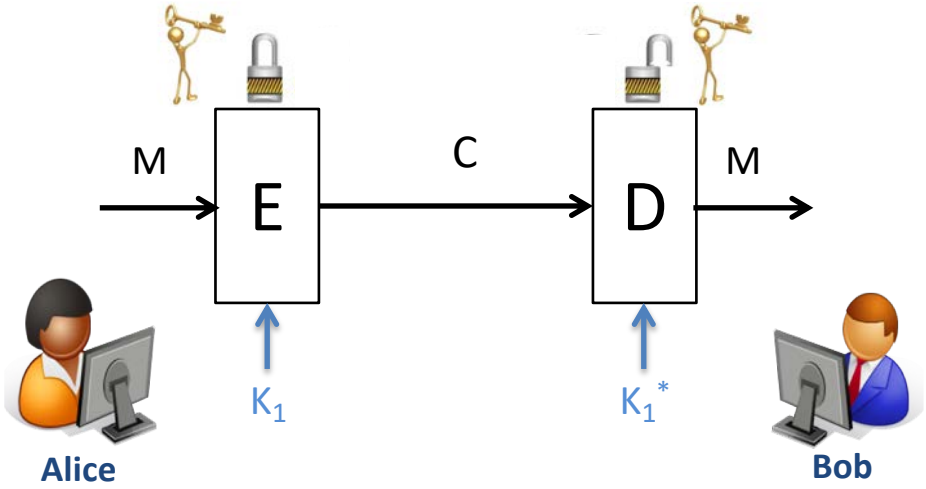
- El esquema anterior es útil siempre que se mantengan en "secreto" la transformación *E* y su inversa *D*
  - Esto es factible para un intercambio de información entre dos usuarios específicos (por ejemplo, *Alice* y *Bob*)
  - Sin embargo, esta forma de funcionamiento resulta no escalable
    - Es decir, cuando *Alice* necesite comunicar con alguien distinto de *Bob*, habría de usar un algoritmo distinto a *E*, como muestra la figura inferior
    - Más concretamente, *Alice* necesitaría un algoritmo distinto para cada usuario con quien necesitara contactar



- Esta problemática se puede solucionar introduciendo un parámetro adicional, la clave secreta *K*, en el algoritmo de cifrado *E*
  - De esta forma, *Alice* puede usar el mismo algoritmo *E* en sus comunicaciones con todos los usuarios (*Bob*, *Carol*, *Dave*, …), pero selecciona una clave *K* distinta para cada uno de ellos



- En esta situación, el mismo algoritmo de descifrado *D* será usado por todos los receptores, pero cada uno necesitará la clave correspondiente de descifrado (K_1^*, K_2^*, K_3^* ...)
- En resumen, para la comunicación específica entre *Alice* y *Bob*:



$$D_{K1^*}(E_{K1} (M)) = M$$

- Por lo tanto, en las nuevas condiciones anteriores, es posible hacer públicos los algoritmos *E* y *D*
  - De hecho, se pueden evaluar públicamente para detectar posibles fallos
    - En caso de no tener fallos, entonces se pueden introducir en herramientas comerciales, etc.
  - Esto se formaliza en el segundo principio de *Kerckhoffs*:
    - *"The system must not be required to be secret, and it must be able to fall into the hands of the enemy without inconvenience"*
- Por lo tanto, la seguridad del sistema dependerá finalmente de que *Alice* y *Bob* mantengan en secreto las claves secretas *K* y *K**
  - Los algoritmos simétricos son aquellos en los que *K* y *K** son la misma clave, y se denomina clave de sesión
  - En los algoritmos asimétricos, las claves *K* y *K** son distintas