



Criptografia

Terminologia

- **Criptografia**

- Arte ou ciência de escrever de forma escondida/confidencial
 - do Gr. kryptós, oculto + graph, r. de graphein, escrever
- Inicialmente para garantir a privacidade da informação
- Esteganografia
 - do Gr. steganós, oculto + graph, r. de graphein, escrever

- **Criptanálise**

- Arte ou ciência de quebrar sistemas criptográficos ou informação criptografada

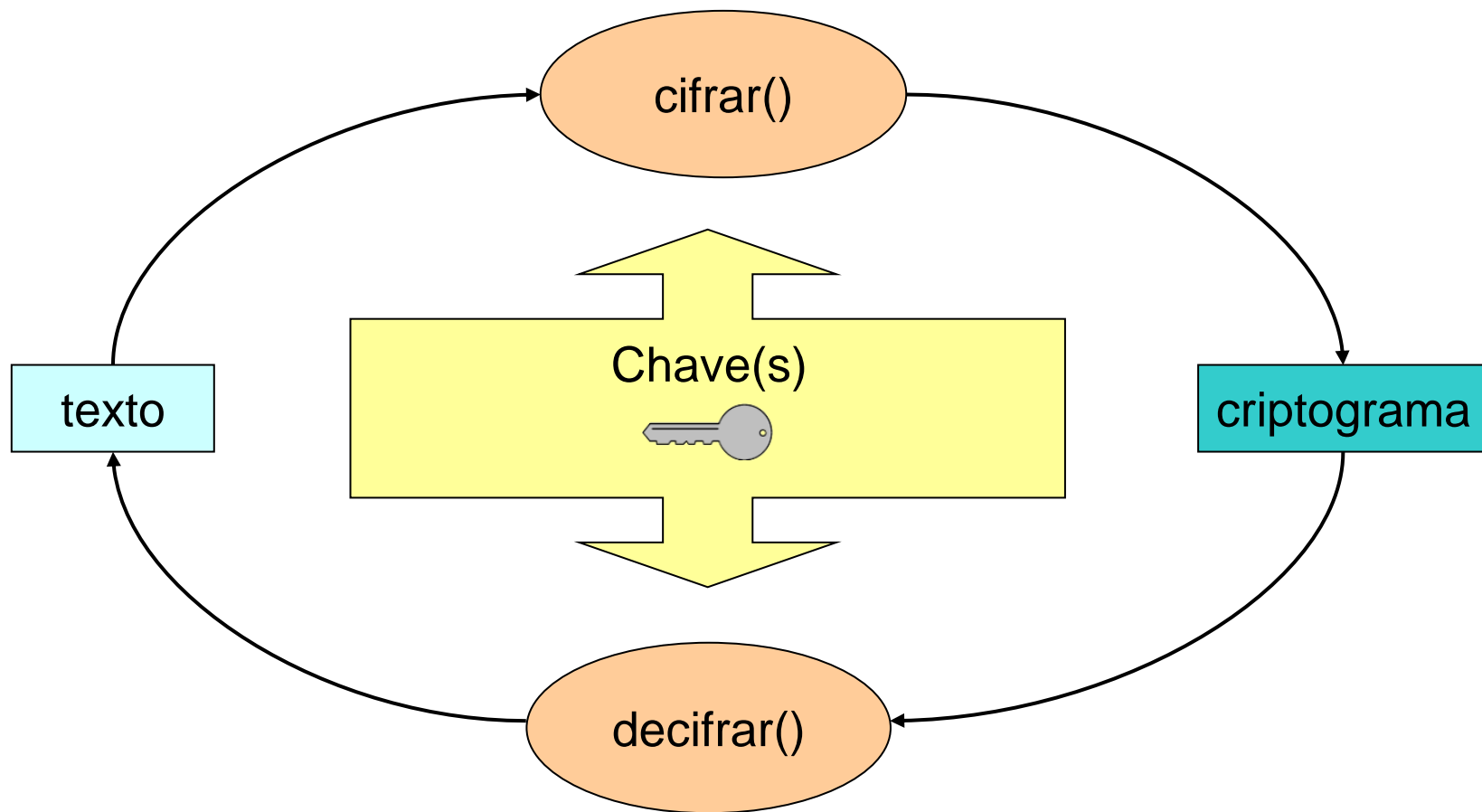
- **Criptologia**

- Criptografia + criptanálise

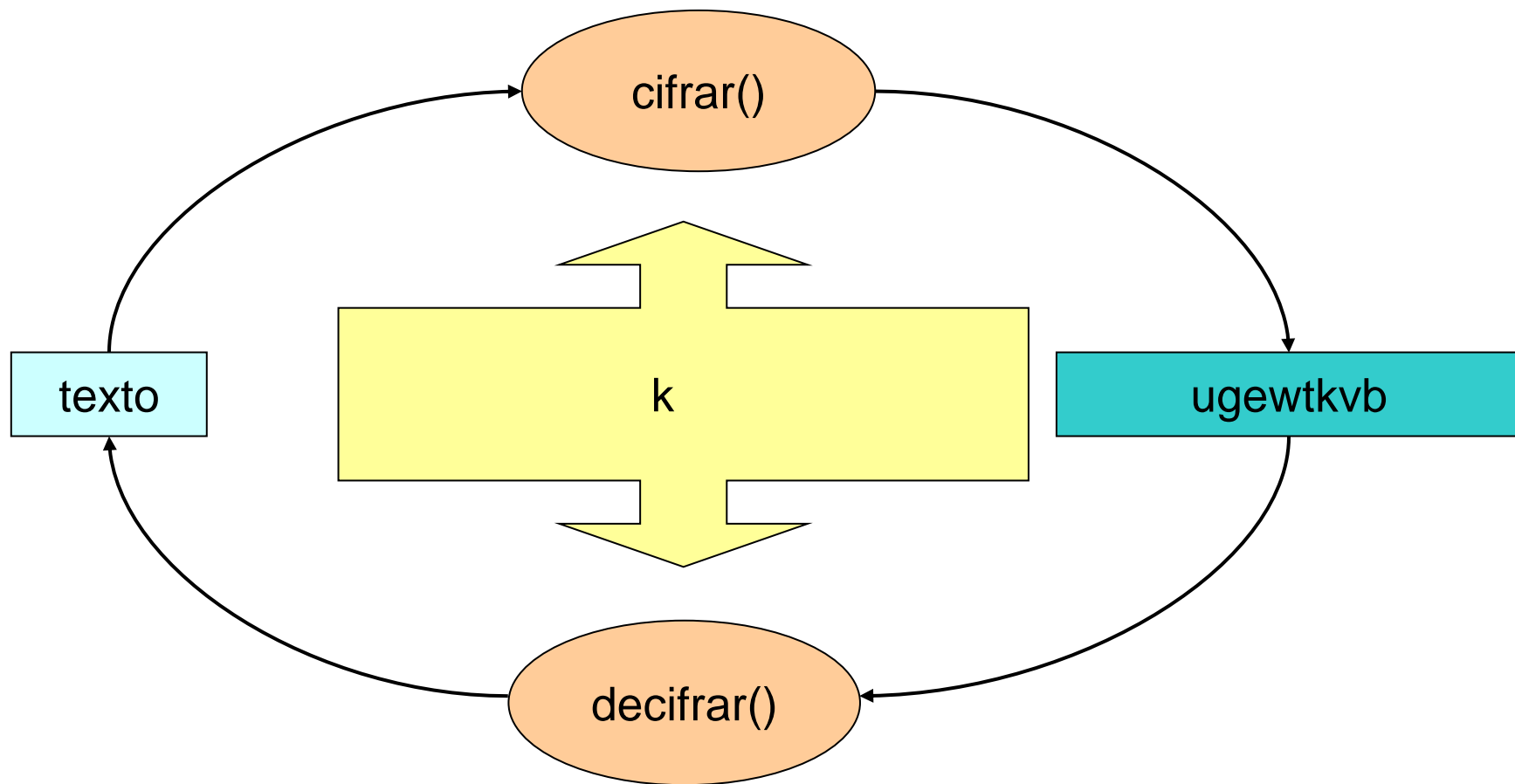
Terminologia

- **Cifra**
 - Técnica concreta de criptografia
- **Operação de uma cifra**
 - **Cifra:** texto em claro -> criptograma
 - **Decifra:** criptograma -> texto em claro
- **Algoritmo:** modo de transformação de dados
- **Chave:** parâmetro do algoritmo
 - Influencia a operação do algoritmo

Operações de uma cifra



Operações de uma cifra



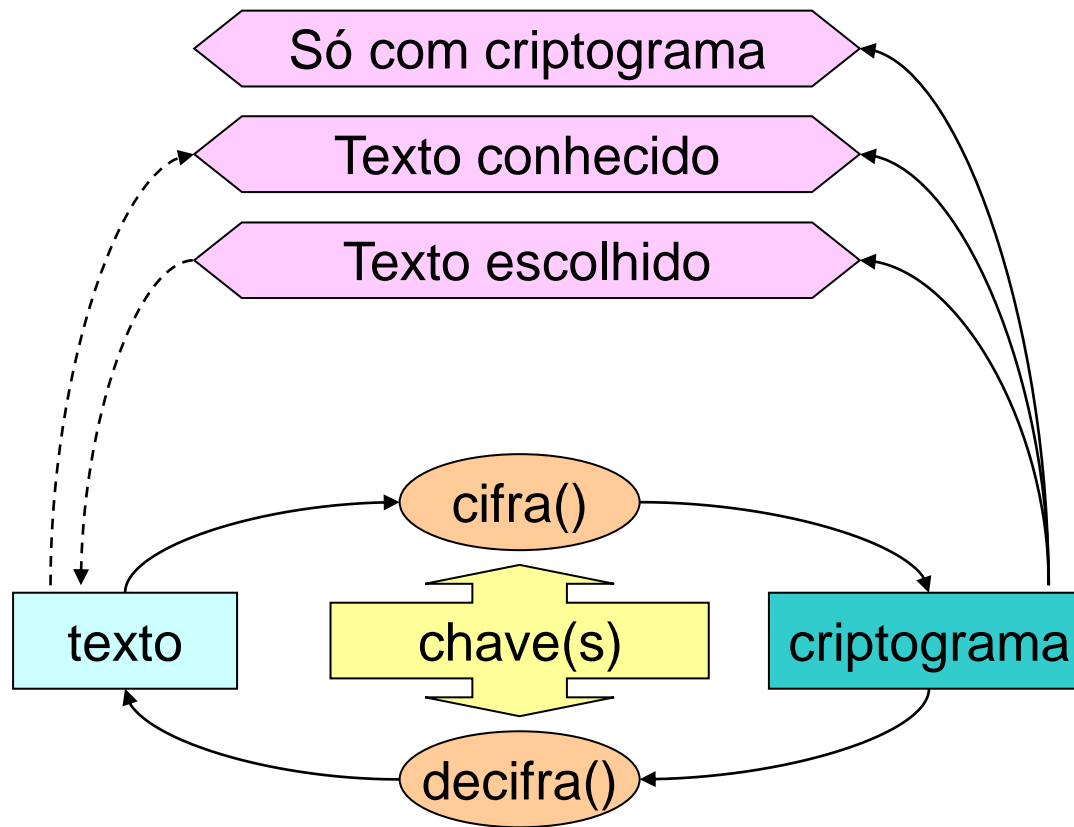
Casos de uso (Cifras Simétricas)

- **Proteção própria com chave K**
 - Alice cifra texto P com chave K
-> Alice: $C = \{P\}_K$
 - Alice decifra C com chave K
-> Alice: $P' = \{C\}_K$
 - P' deverá ser igual a P (deve ser verificado)
- **Comunicações seguras com chave K**
 - Alice cifra texto P com chave K
-> Alice: $C = \{P\}_K$
 - Bob decifra C com chave K
-> Bob: $P' = \{C\}_K$
 - P' deve ser igual a P (deve ser verificado)

Criptanálise: Objetivos

- **Obtenção do texto original**
 - Relativo a um criptograma
- **Obtenção de uma chave de cifra**
 - Ou de uma equivalente
- **Obtenção do algoritmo de cifra**
 - Ou de um equivalente
 - Normalmente os algoritmos não são secretos, mas existem exceções:
 - Lorenz, A5 (GSM), RC4, Crypto-1 (Mifare)
 - Algoritmos para DRM (Digital Rights Management)
 - Por engenharia reversa

Ataques por Criptanálise



Ataques por Criptanálise

- **Força Bruta (ataque genérico)**

- Pesquisa exaustiva sobre todo o espaço de chaves, até se encontrar uma chave adequada
- Não é prática para espaços de dimensão grande
 - ex. chaves de 128 bits possuem um espaço de 2^{128} bits.
- É importante que exista aleatoriedade na chave.

- **Ataques mais inteligentes**

- Reduzir o espaço de pesquisa para uma dimensão menor:: palavras, números, conjunto reduzido, alfabeto
- Identificar padrões em algumas operações, etc..

Evolução das Cifras

- **Manuais:** Algoritmos de substituição ou transposição



Fonte: Wikimedia Commons e CryptoMuseum

Evolução das Cifras

- **Mecânicas**

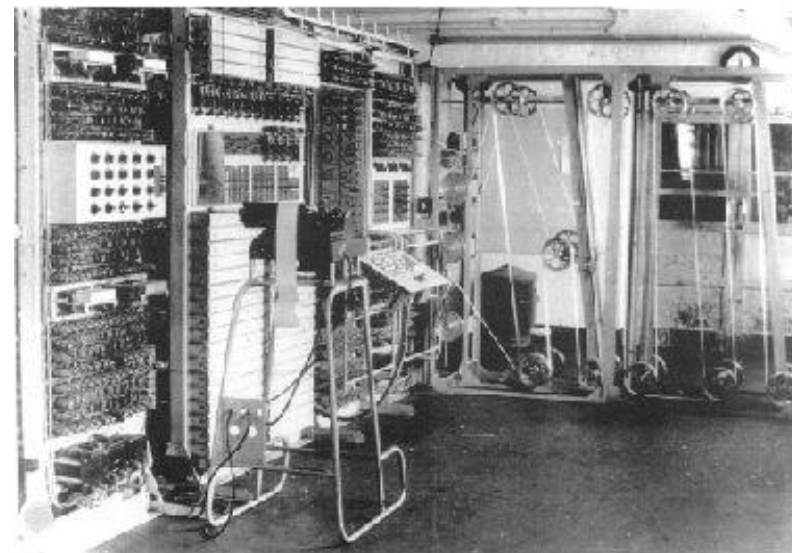
- A partir do Séc. XIX
 - Máquina Enigma
 - M-209 Converter
- Algoritmos de substituição ou transposição
 - Elementos críticos para a 2ª Grande Guerra



Evolução das Cifras

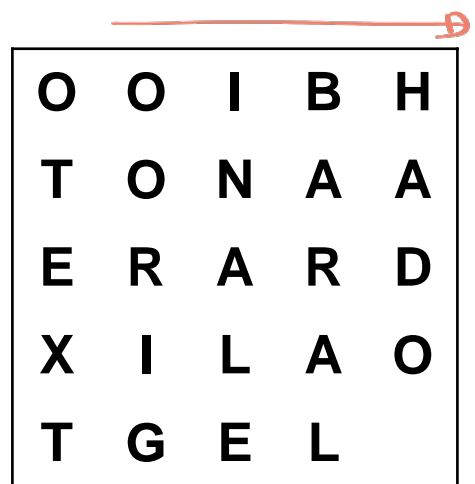
- **Cifras Informáticas**

- Surgem com o uso dos computadores
- Algoritmos de substituição mais complexos
- Algoritmos matemáticos de grandes números ou problemas complexos
- Utilizados de forma comum (e transparente) no dia a dia



Cifras: Tipos Básicos

- **Transposição:** O texto original é “baralhado”



O	O	I	B	H
T	O	N	A	A
E	R	A	R	D
X	I	L	A	O
T	G	E	L	

- **Resultado:** ooibh tonaa erard xilao tgel

Cifras: Tipos Básicos

- **Transposição:** Permutações intra-blocos

P	E	R	M	U
T	A	C	O	E
S	I	N	T	R
A	B	L	O	C
O	S			

- **Resultado:**
 - (13524) -> pruem tceao snrit alcbo os
 - (25413) -> eumpr aeotc irts n bcoal so

Cifras: Tipos Básicos

- **Substituição**

- Cada símbolo original é substituído por outros
- Considera símbolos como letras, dígitos e pontuação
- Na realidade são blocos de bits

- **Estratégias de substituição**

- Mono alfabética (um para um)
- Poli-alfabética (muitos para um)
- Homofónica (um para muitos)

Cifras: Mono-alfabéticas

- Usam apenas um alfabeto de substituição
 - Com um número de elementos #A
- Exemplos
 - Aditivas (ou de translação)
 - $\text{cripto} - \text{letra} = (\text{letra} + \text{chave}) \bmod \#A$
 - $\text{letra} = (\text{cripto} - \text{letra} - \text{chave}) \bmod \#A$
 - Número de chaves efetivas = #A
 - Cifra de César (ROT-x)
 - Com frase-chave
 - ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
 - QTUWXYZCOMFRASEHVBDGIJKNP
 - Número de chaves efetivas = #alfabeto! $\rightarrow 26! \approx 288$
- Problemas
 - Reproduzem padrões do texto original
 - Letras, digramas, trigramas, etc.
 - A análise estatística facilita a criptanálise
 - “The Gold Bug”, Edgar Allan Poe

Cifras: Mono-alfabéticas

a good glass in the
bishop's hostel in the
devil's seat fifty-one
degrees and thirteen
minutes northeast and
by north main branch
seventh limb east side
shoot from the left eye
of the death's-head a
bee line from the tree
through the shot forty
feet out

53‡‡‡305))6*;4826)4‡.)
4‡);806*;48‡860))85;1‡
(;‡*8‡83(88)5*‡;46(;8
8*96*‡;8)*‡(;485);5*‡2
:*‡(;4956*2(5*—4)88*;4
069285);)6‡8)4‡‡;1(‡9;
48081;8:8‡1;48‡85;4)48
5‡528806*81(‡9;48;(88;
4(‡?34;48)4‡;161;:188;
‡?;

Cifras: Mono-alfabéticas

53‡‡‡305))6*;4826)4‡.)4‡);80
agoodglassinthebishopshostel

6*;48‡8¶60))85;1‡(;‡*8‡83(88)
inthedevilsseatfortyonedegrees

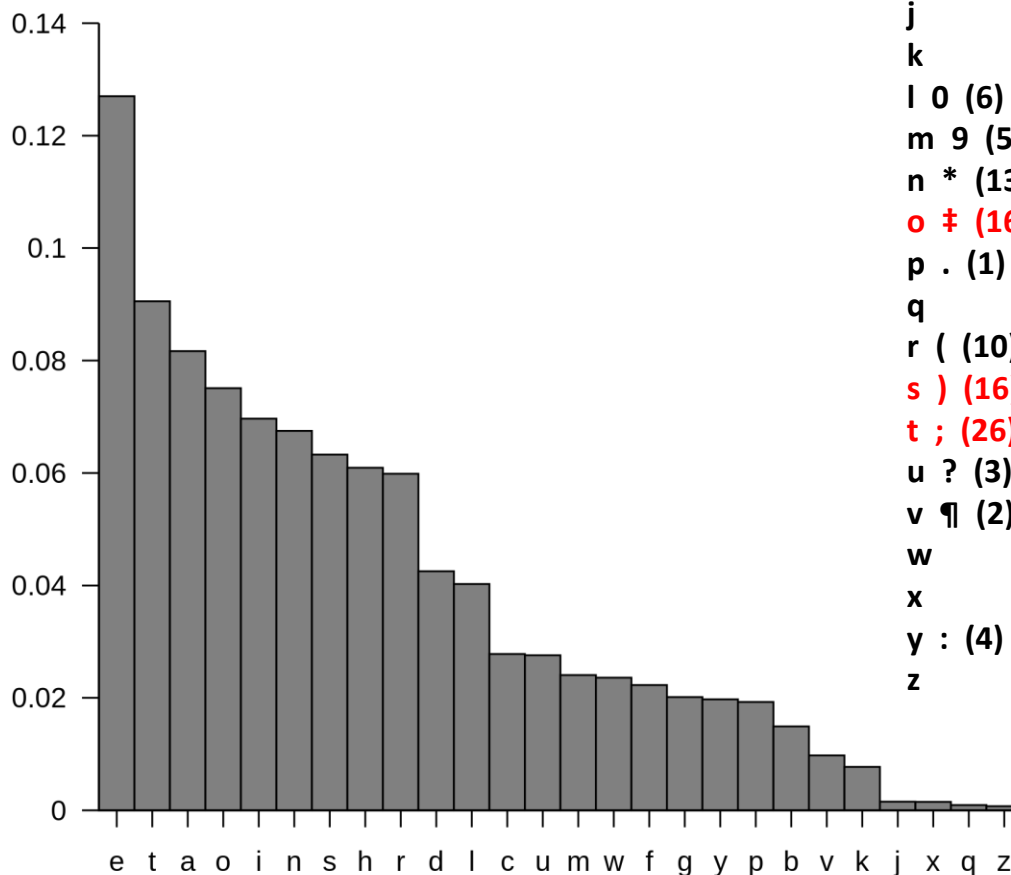
5*‡;46(;88*96*‡;8)*‡(;485);5*‡
andthirteenminutesnortheastand

2:*‡(;4956*2(5*-4)8¶8*;40692
bynorthmainbranchseventhlimb

85);)6‡8)4‡‡;1(‡9;48081;8:8‡1
eastsideshootfromthellefteyeof

;48‡85;4)485‡528806*81(‡9;48
thedeathsheadabeelinefromthe

; (88;4(‡?34;48)4‡;161;;188;‡?
treethroughtheshotfiftyfeetout



a 5 (12)
b 2 (5)
c - (1)
d † (8)
e 8 (33)
f 1 (8)
g 3 (4)
h 4 (19)
i 6 (11)
j
k
l 0 (6)
m 9 (5)
n * (13)
o ‡ (16)
p . (1)
q
r ((10)
s) (16)
t ; (26)
u ? (3)
v ¶ (2)
w
x
y : (4)
z

Cifras: Mono-alfabéticas

- **Frequência de Pares**
 - AO, NO, AS, OS, SO, UM, IA, NA...
- **Frequência de Triplos**
 - QUE, NAO, EST, ENT, ÇÃO, TRA...
- **Probabilidades condicionais**
 - $P(A \mid B)$ diferente de $P(Z \mid B)$

Cifras: Poli-alfabéticas

- Usam **N** alfabetos de substituição
 - Têm período **N**
- **Exemplo:** Cifra de Vigenère
- **Problemas**
 - Conhecido o período, podem ser analisadas como N mono alfabéticas
 - O período pode ser descoberto usando estatística
 - Método de Kasiski
 - Fatorização de distâncias entre blocos iguais do criptograma
 - Índice de coincidência
 - Fatorização de deslocamentos relativos que produzem mais coincidências na sobreposição do criptograma

Cifra de Vigenère

	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
a	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
b	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	A
c	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B
d	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C
e	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D
f	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E
g	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F
h	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G
i	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H
j	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I
k	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
l	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
m	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
n	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
o	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
p	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
q	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
r	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
s	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
t	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
u	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
v	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
w	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
x	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
y	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
z	Z	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

Exemplo de se cifrar a letra **M** com a chave **S**, resultando no criptograma **E**

Criada por Blaise Vigenère (final séc XVI) (le chiffre indéchiffrable!)

Quebrada no séc XIX por Charles Babbage e Friedrich Kasiski

Cifra de Vigenère

- **Texto:**

Eles não sabem que o sonho é uma constante da vida
tão concreta e definida como outra coisa qualquer,
como esta pedra cinzenta em que me sento e descanso,
como este ribeiro manso, em serenos sobressaltos
como estes pinheiros altos

- **Cifra com o quadrado de Vigenère e chave “poema”**

texto	elesnaosabemqueosonhoeumaconstanteda vidaataoconcretaedefinida
chave	poemapoemapoemapoemapoemapoemapoemapoemapoemapoema
criptograma	tzienpcwmbtaugedgszhdsyyarcetpbxqdpjmpaiosocqvqtpshqfxbmpa

Criptanálise de um criptograma Vigenère

Teste de Kasiski

- Localizar padrões comuns no criptograma
- Calcular afastamento entre padrões
- O maior divisor comum sugere a dimensão da chave (gcd)

tzienpcwmbtaugedgszhdsyyarcretpbxqdpj**mpa**iosocqvq**tp**shqfxb**mpa**

mpa	$20 = 2 \times 2 \times 5$
tp	$20 = 2 \times 2 \times 5$

- Com o texto indicado:
- Com o poema completo:

$175 = 5 \times 5 \times 7$
$105 = 3 \times 5 \times 7$
$35 = 5 \times 7$
$20 = 2 \times 2 \times 5$

Criptanálise de um criptograma Vigenère

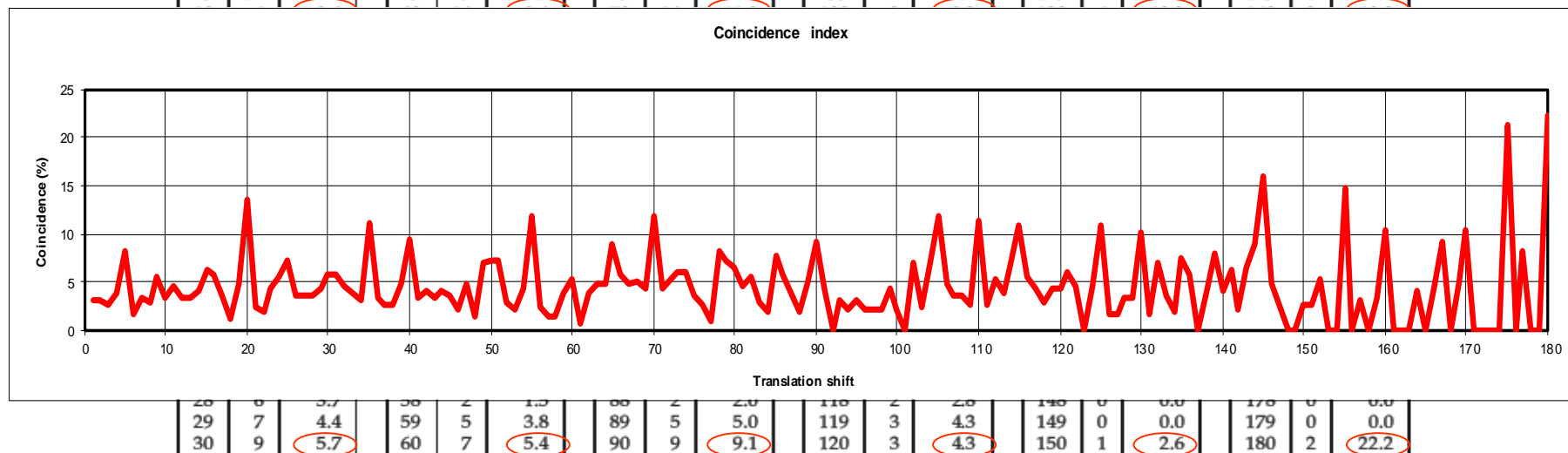
- Índice de coincidência (c/ poema completo)
 - Sobreposição de uma cópia, com afastamento
 - Contagem dos caracteres que se repetem

D	I	P (%)	D	I	P (%)	D	I	P (%)	D	I	P (%)	D	I	P (%)	D	I	P (%)
1	6	3.2	31	9	5.7	61	1	0.8	91	4	4.1	121	4	5.9	151	1	2.6
2	6	3.2	32	7	4.5	62	5	3.9	92	0	0.0	122	3	4.5	152	2	5.4
3	5	2.7	33	6	3.8	63	6	4.8	93	3	3.1	123	0	0.0	153	0	0.0
4	7	3.8	34	5	3.2	64	6	4.8	94	2	2.1	124	3	4.6	154	0	0.0
5	15	8.2	35	17	11.0	65	11	8.9	95	3	3.2	125	7	10.9	155	5	14.7
6	3	1.6	36	5	3.3	66	7	5.7	96	2	2.2	126	1	1.6	156	0	0.0
7	6	3.3	37	4	2.6	67	6	4.9	97	2	2.2	127	1	1.6	157	1	3.1
8	5	2.8	38	4	2.6	68	6	5.0	98	2	2.2	128	2	3.3	158	0	0.0
9	10	5.6	39	7	4.7	69	5	4.2	99	4	4.4	129	2	3.3	159	1	3.3
10	6	3.4	40	14	9.4	70	14	11.8	100	2	2.2	130	6	10.2	160	3	10.3
11	8	4.5	41	5	3.4	71	5	4.2	101	0	0.0	131	1	1.7	161	0	0.0
12	6	3.4	42	6	4.1	72	6	5.1	102	6	6.9	132	4	7.0	162	0	0.0
13	6	3.4	43	5	3.4	73	7	6.0	103	2	2.3	133	2	3.6	163	0	0.0
14	7	4.0	44	6	4.1	74	7	6.1	104	6	7.1	134	1	1.8	164	1	4.0
15	11	6.3	45	5	3.5	75	4	3.5	105	10	11.9	135	4	7.4	165	0	0.0
16	10	5.8	46	3	2.1	76	3	2.7	106	4	4.8	136	3	5.7	166	1	4.3
17	6	3.5	47	7	4.9	77	1	0.9	107	3	3.7	137	0	0.0	167	2	9.1
18	2	1.2	48	2	1.4	78	9	8.1	108	3	3.7	138	2	3.9	168	0	0.0
19	8	4.7	49	10	7.1	79	8	7.3	109	2	2.5	139	4	8.0	169	1	5.0
20	23	13.6	50	10	7.2	80	7	6.4	110	9	11.4	140	2	4.1	170	2	10.5
21	4	2.4	51	10	7.2	81	5	4.6	111	2	2.6	141	3	6.2	171	0	0.0
22	3	1.8	52	4	2.9	82	6	5.6	112	4	5.2	142	1	2.1	172	0	0.0
23	7	4.2	53	3	2.2	83	3	2.8	113	3	3.9	143	3	6.5	173	0	0.0
24	9	5.5	54	6	4.4	84	2	1.9	114	5	6.7	144	4	8.9	174	0	0.0
25	12	7.3	55	16	11.9	85	8	7.7	115	8	10.8	145	7	15.9	175	3	21.4
26	6	3.7	56	3	2.3	86	6	5.8	116	4	5.5	146	2	4.7	176	0	0.0
27	6	3.7	57	2	1.5	87	4	3.9	117	3	4.2	147	1	2.4	177	1	8.3
28	6	3.7	58	2	1.5	88	2	2.0	118	2	2.8	148	0	0.0	178	0	0.0
29	7	4.4	59	5	3.8	89	5	5.0	119	3	4.3	149	0	0.0	179	0	0.0
30	9	5.7	60	7	5.4	90	9	9.1	120	3	4.3	150	1	2.6	180	2	22.2

Criptanálise de um criptograma Vigenère

- Índice de coincidência (c/ poema completo)
 - Sobreposição de uma cópia, com afastamento
 - Contagem dos caracteres que se repetem

D	I	P (%)	D	I	P (%)	D	I	P (%)	D	I	P (%)	D	I	P (%)	D	I	P (%)
1	6	3.2	31	9	5.7	61	1	0.8	91	4	4.1	121	4	5.9	151	1	2.6
2	6	3.2	32	7	4.5	62	5	3.9	92	0	0.0	122	3	4.5	152	2	5.4
3	5	2.7	33	6	3.8	63	6	4.8	93	3	3.1	123	0	0.0	153	0	0.0
4	7	3.8	34	5	3.2	64	6	4.8	94	2	2.1	124	3	4.6	154	0	0.0
5	15	8.2	35	17	11.0	65	11	8.9	95	3	3.2	125	7	10.9	155	5	14.7
6	3	1.6	36	5	3.3	66	7	5.7	96	2	2.2	126	1	1.6	156	0	0.0
7	6	3.3	37	4	2.6	67	6	4.9	97	2	2.2	127	1	1.6	157	1	3.1
8	5	2.8	38	4	2.6	68	6	5.0	98	2	2.2	128	2	3.3	158	0	0.0
9	10	5.6	39	7	4.7	69	5	4.2	99	4	4.4	129	2	3.3	159	1	3.3

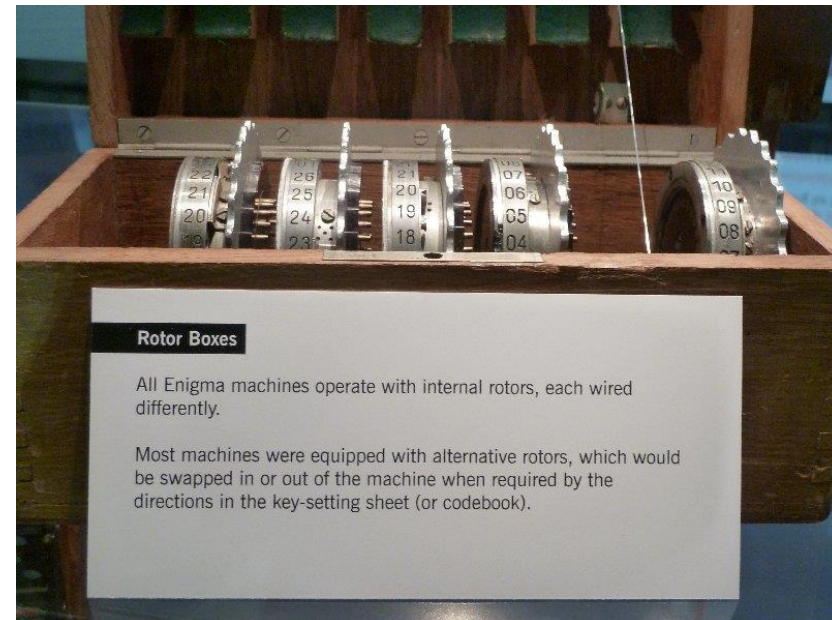


Máquinas de Rotores



Máquinas de Rotores

- **As máquinas de rotores concretizam cifras poli-alfabéticas complexas**
 - Cada rotor efetua uma permutação do alfabeto
 - Que consiste num conjunto de substituições
 - A posição do rotor concretiza um alfabeto de substituição
 - A rotação de um rotor concretiza uma cifra poli-alfabética
 - Acumulando vários rotores em sequência e rodando-os de forma diferenciada consegue-se uma cifra poli-alfabética complexa
- **A chave de cifra é:**
 - O conjunto de rotores usado
 - A ordem relativa dos rotores
 - A posição de avanço do rotor seguinte
 - A posição original dos rotores
- **Rotores simétricos (bidirecionais) permitem decifras usando cifras duplas**
 - Usando um disco refletor (meio-rotor)

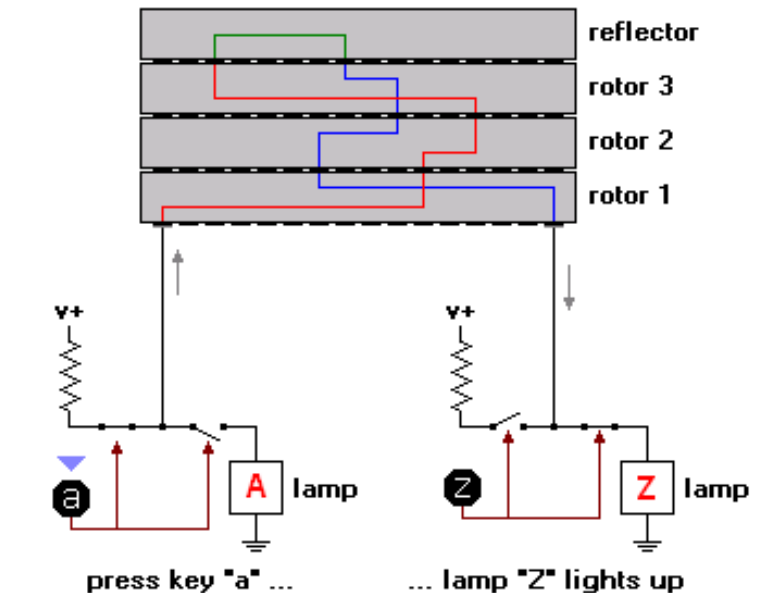


Sarah Witherby, www.flickr.com

Máquinas de Rotores

- **Operação recíproca com um refletor**

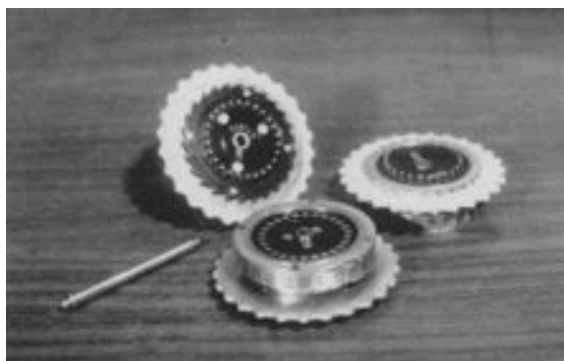
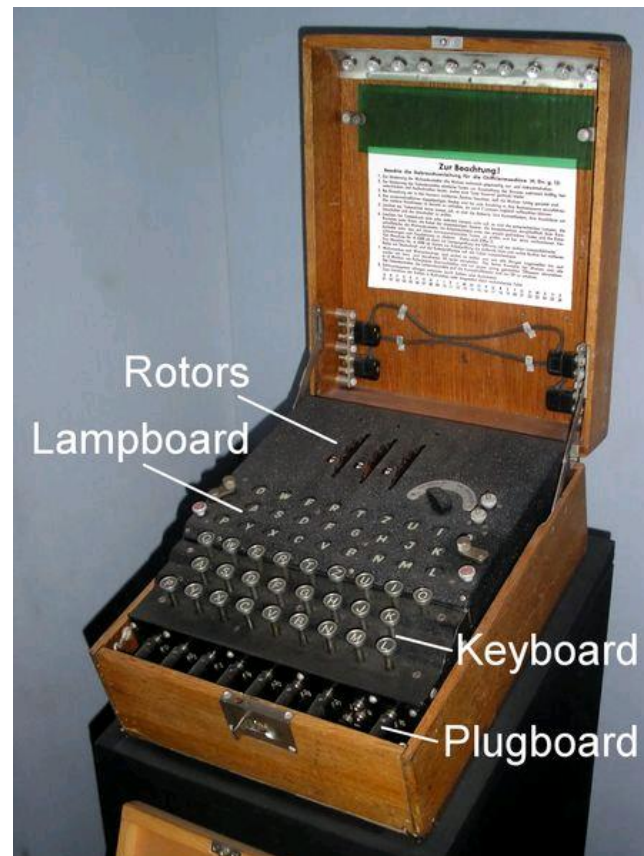
- O operador emissor carrega em “A” (o texto em claro) e obtém “Z” como criptograma, o qual é transmitido
- O operador recetor carrega em “Z” (o criptograma) e obtém “A” como texto em claro
- Uma letra nunca pode ser cifrada para si própria!



RECIPROCAL OPERATION OF THE ENIGMA

Enigma

- Máquina de rotores alemã da 2ª GG
- Originalmente apresentada em 1919
 - Enigma I, com 3 rotores
- Foram usadas diversas variantes
 - Com diferentes números de rotores
 - Com cablagem para permutar alfabetos
- Seleções de chaves distribuídas em livros de códigos
- <https://observablehq.com/@tmcw/enigma-machine>



Criptografia: Aproximações Teóricas

- **Espaço de texto**

- Número de combinações de texto diferentes (M)

- **Espaço do criptograma**

- Número de combinações de criptograma diferentes (C)

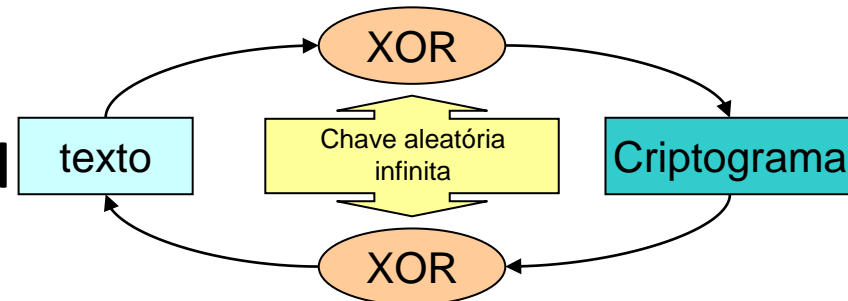
- **Espaço das chaves**

- Número de chaves diferentes para um algoritmo de cifra (K)

- **Cifra perfeita**

- Dado $c_j \in C$, $H(M | C) = H(M)$
 - $H(M | C)$ é a entropia condicional de M dado C
 - $H(M)$ é a entropia de M
- $\#K \geq \#C \geq \#M$

- **Cifra de Vernam: One-time pad**



Criptografia: Aproximações Práticas

- **Teoricamente seguras vs. seguras na prática**

- Uso teórico != exploração prática
- Práticas incorretas podem comprometer boas cifras
- Exemplo: reutilização de one-time-pads

- **Cifras seguras na prática**

- A segurança é assegurada pela dificuldade computacional de realizar a criptanálise
 - Usando força bruta
- Têm uma segurança baseada em limites razoáveis:
 - Custo de uma solução técnica de criptanálise
 - Infraestrutura reservada para a criptanálise
 - Tempo útil de criptanálise

Criptografia: Aproximações Práticas

5 critérios de Shannon

1. **A quantidade de secretismo oferecida**
 - e.g o comprimento da chave
2. **A complexidade na escolha das chaves**
 - e.g. geração da chave, deteção de chaves fracas
3. **A simplicidade da realização**
4. **A propagação de erros**
 - Relevante em ambientes com erros (canais de comunicação ruidosos)
5. **A dimensão do criptograma**
 - Relativamente aos respetivos textos originais

Criptografia: Aproximações Práticas

- **Confusão: Complexidade na relação entre o texto, a chave e o criptograma**
 - Os bits resultantes (criptograma) devem depender dos bits de entrada (texto e chave) de uma forma complexa
- **Difusão: Alteração de grandes porções do criptograma em função de uma pequena alteração do texto**
 - Se um bit de texto se alterar, então o criptograma deverá **mudar substancialmente**, de uma forma imprevisível e pseudoaleatória
 - **Efeito de avalanche**

Criptografia: Aproximações Práticas

Assumir sempre o pior caso

- **O criptanalista conhece o algoritmo**
 - A segurança está na chave
- **O criptanalista possui grande número de criptogramas gerados com um algoritmo e chave**
 - Os criptogramas não são secretos
- **Os criptanalista conhecem parte dos textos originais**
 - É normal haver alguma noção do texto original
 - Ataques com texto conhecido
 - Ataques com texto escolhido

Robustez criptográfica

- **A robustez dos algoritmos e a sua resistência a ataques**
 - Ninguém consegue avaliar a robustez de forma precisa
 - Podem especular ou demonstrar usando outras suposições
 - São robustos até que alguém os quebre
 - Existem orientações públicas sobre o que deve/não deve ser usado
 - Antecipar problemas futuros
- **Algoritmos públicos, sem ataques conhecidos, supostamente são mais robustos**
 - Mais investigadores à procura de fraquezas
- **Algoritmos com chaves maiores são tendencialmente mais robustos**
 - Mas frequentemente também são mais lentos.

Robustez criptográfica: AES

- **1997: NIST lançou desafio para o próximo Advanced Encryption Protocol**
 - de conhecimento e utilização públicos, simétrico, chaves de 128, 192 e 256 bits
- **1998: 15 candidatos apresentados por investigadores**
 - CAST-256, Crypton, DEAL, DFC, Frog, HPC, LOKI97, Magenta, MARS, RC6, Rijndael, Safer+, Serpent, Twofish
 - Comunidade tentou encontrar problemas nos candidatos
- **1999: 5 propostas demonstraram ser seguras**
 - MARS, RC6, Rijndael, Twofish
 - Novamente a comunidade tentou encontrar problemas e avaliar a performance
- **2001: Rijndael selecionado como o vencedor**
 - Versões reduzidas do MARS foram quebradas , RC6 e Twofish são seguros
- **2002: Publicado como FIPS PUB 197 e é largamente utilizado**

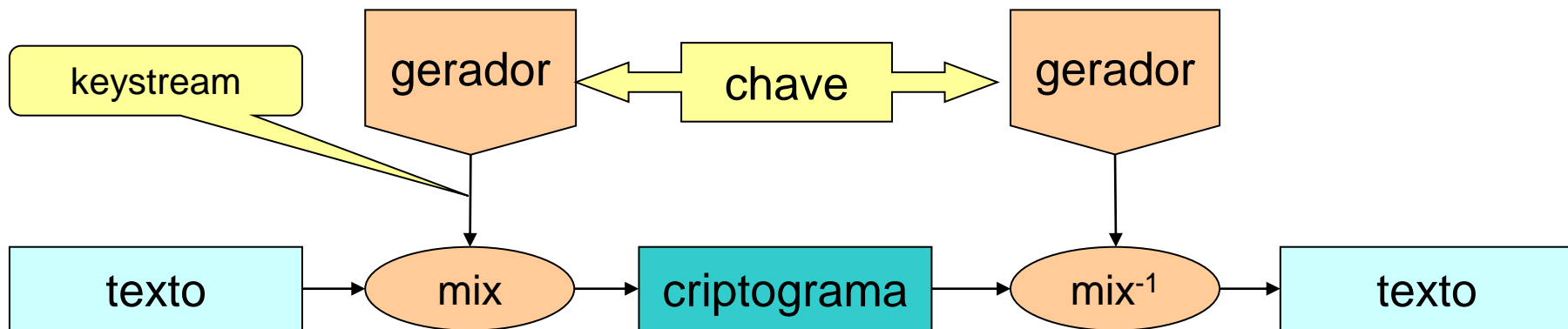
Cifras Contínuas (Stream)

- Mistura de uma chave contínua (keystream) com o texto ou criptograma
 - Chave contínua aleatória (cifra de Vernam, one-time pad)
 - Chave contínua pseudoaleatória (produzida por gerador)
- Função de mistura invertível
 - e.g. XOR bit a bit (\oplus)

$$C = P \oplus ks \quad P = C \oplus ks$$

- Cifra poli-alfabética
 - Cada símbolo da chave contínua define um alfabeto

Cifras Contínuas (Stream)



Cifras Contínuas (Stream)

- **Keystream pode ser infinita, mas possui um período**
 - Período depende do gerador
- **Questões práticas de segurança**
 - Cada keystream só pode ser usada uma vez!
 - Caso contrário, a soma dos criptogramas fornece a soma dos textos

$$C1 = P1 \oplus Ks, \quad C2 = P2 \oplus Ks \quad \rightarrow \quad C1 \oplus C2 = P1 \oplus P2$$

- Dimensão do texto tem de ser menor que o período
 - Exposição da keystream é total com textos escolhidos/conhecidos
 - Período permitem analistas conhecer partes do texto
- Controlo de integridade é mandatório
 - Não existe difusão, apenas confusão
 - Criptogramas podem ser manipulados livremente

Lorenz (Tunny)

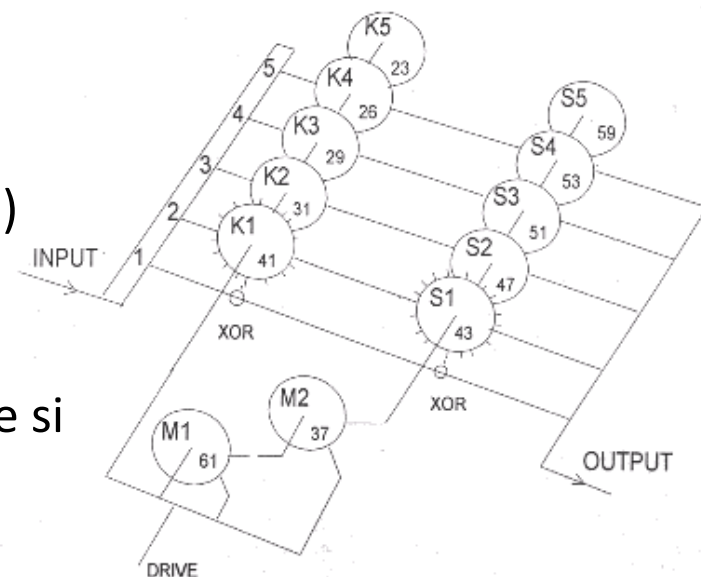


- **Cifra contínua com 12 rotores**

- Usada pelos alemães durante a 2 G. Guerra
- Cada caractere de 5 bits é misturado com 5 keystreams

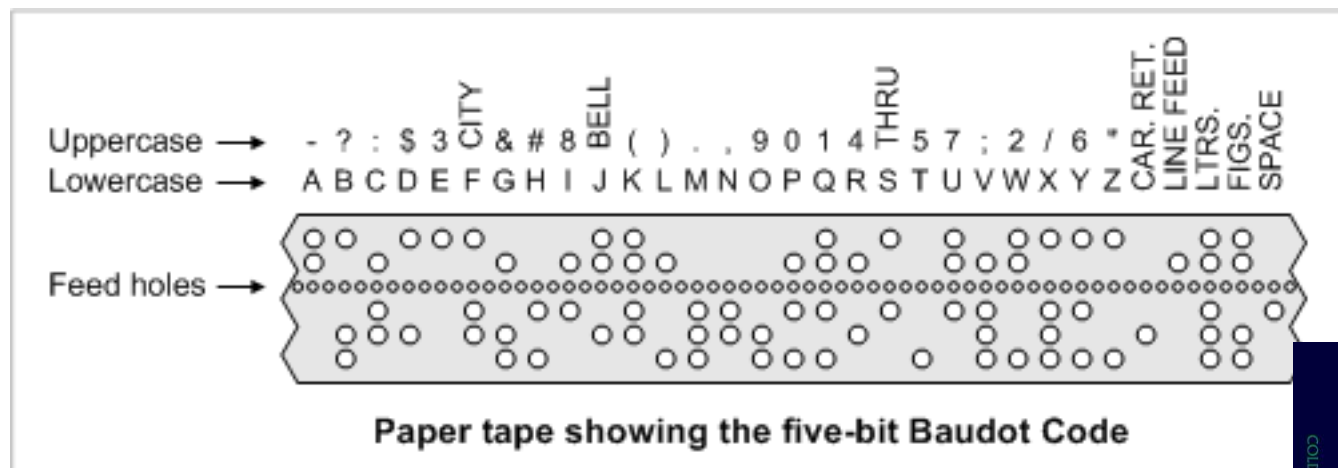
- **Operação**

- 5 rotores movendo-se regularmente (χ)
- 5 rotores movendo-se irregularmente (ψ)
- 2 rotores motorizados
 - para acionar os rotores (ψ)
- Número de espaços é sempre primo entre si



Criptanálise da Tunny

- **A estrutura interna não era conhecida**
 - Apenas foi conhecida depois do final da guerra
 - Sabiam que a máquina existia porque intercetavam mensagens cifradas com 5 bits
 - Usando Códigos Baudot de 32 símbolos (e não Morse)



De interesse: 2014, The Imitation Game

Criptanálise da Tunny

O erro (30 de agosto de 1941)

- **Um operador alemão tinha uma grande mensagem para enviar (~4,000 caracteres)**
 - Configurou a sua Lorenz e enviou um indicador de 12 letras (posição inicial dos rotores) para o recetor
 - Depois de ter escrito ~4,000 caracteres, manualmente, recebeu do recetor “envie outra vez” (em texto)
- **O operador emissor recolocou a sua Lorenz na mesma posição inicial**
 - Mesma chave contínua! Completamente proibido!
- **O emissor recomeçou o envio da mensagem, manualmente**
 - Mas escreveu algo ligeiramente diferente! (abreviaturas)

Criptanálise da Tunny

$$C0 = \text{Texto0} \oplus Ks$$

$$C1 = \text{Texto1} \oplus Ks$$

$$T1 = C0 \oplus C1 \oplus T0 \rightarrow \text{Variações do Texto}$$

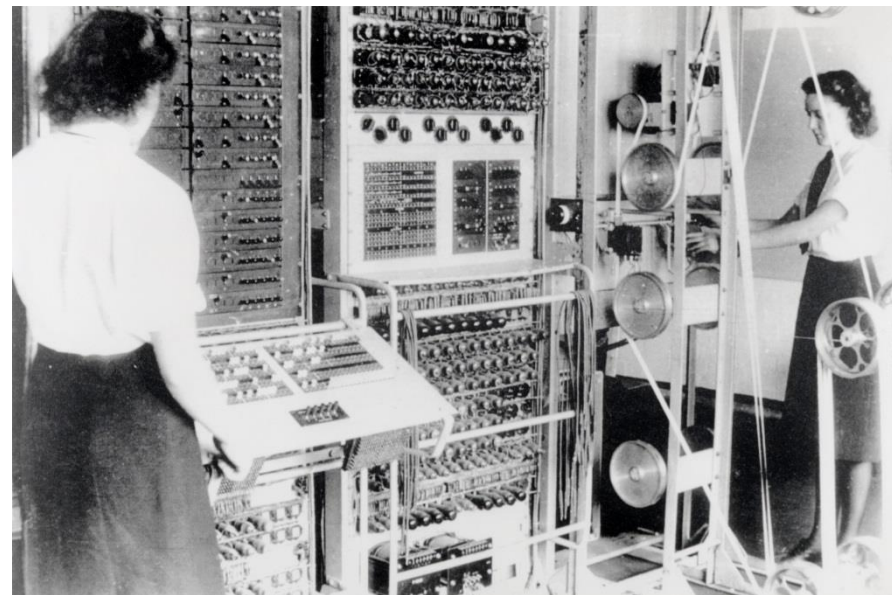
Se parte to texto inicial (Texto0) for conhecido, as variações podem ser encontradas

Criptanálise da Tunny

- **A mensagem começava com um texto padrão: SPRUCHNUMMER — número de mensagem**
 - Na primeira vez o operador escreveu: **S P R U C H N U M M E R**
 - Na segunda vez escreveu: **S P R U C H N R**
 - Assim, imediatamente após o N os dois criptogramas eram diferentes!
- **As mensagens foram completamente decifradas por John Tiltman, em Bletchley Park, usando combinações aditivas dos criptogramas (chamados Depths)**
 - A segunda mensagem era cerca de 500 caracteres mais curta que a primeira
- **Assim se conseguiu obter, pela 1ª vez, um exemplar longo de uma chave contínua Lorenz**
 - Tiltman ainda não sabia como a Lorenz operava, apenas sabia que o que tinha era o resultado da sua operação!

Tunny

- **A estrutura da cifra foi deduzida da chave contínua capturada**
 - Mas a decifra dependia do conhecimento da posição inicial dos rotores
- **Os alemães começaram a usar números para definir o estado inicial dos rotores**
 - Bill Tutte desenvolveu um método para o encontrar
 - A máquina Colossus foi desenvolvida para o aplicar
- **Colossus**
 - Conceção começou em março de 1943
 - O Colossus Mark 1 (1500 válvulas) operacional em jan. de 1944
 - Reduziu o tempo de criptanálise de semanas para horas



Cifras Modernas: Tipos

- **Quanto à operação**
 - Por blocos (mono-alfabéticas)
 - Contínuas (poli-alfabéticas)
- **Quanto ao tipo de chave**
 - Simétricas (chave secreta ou segredo partilhado)
 - Potencialmente sujeitas a caução (escrowing)
 - Assimétricas (chave pública)
- **Combinatória**

	Cifras Por Blocos	Cifras Contínuas
Cifras Simétricas		
Cifras Assimétricas		NÃO EXISTEM

Cifras Simétricas

Chave secreta única, partilhada por 2 ou mais interlocutores

- **Permitem**

- Confidencialidade para todos os conhecedores da chave
- Autenticação de mensagens (cifra por blocos)
 - Quando se usam cifras por blocos

- **Vantagens**

- Desempenho (normalmente muito eficientes)

- **Desvantagens**

- N interlocutores, 2 a 2 secretamente -> $N \times (N-1)/2$ chaves

- **Problemas**

- Distribuição de chaves

Cifras Simétricas Contínuas

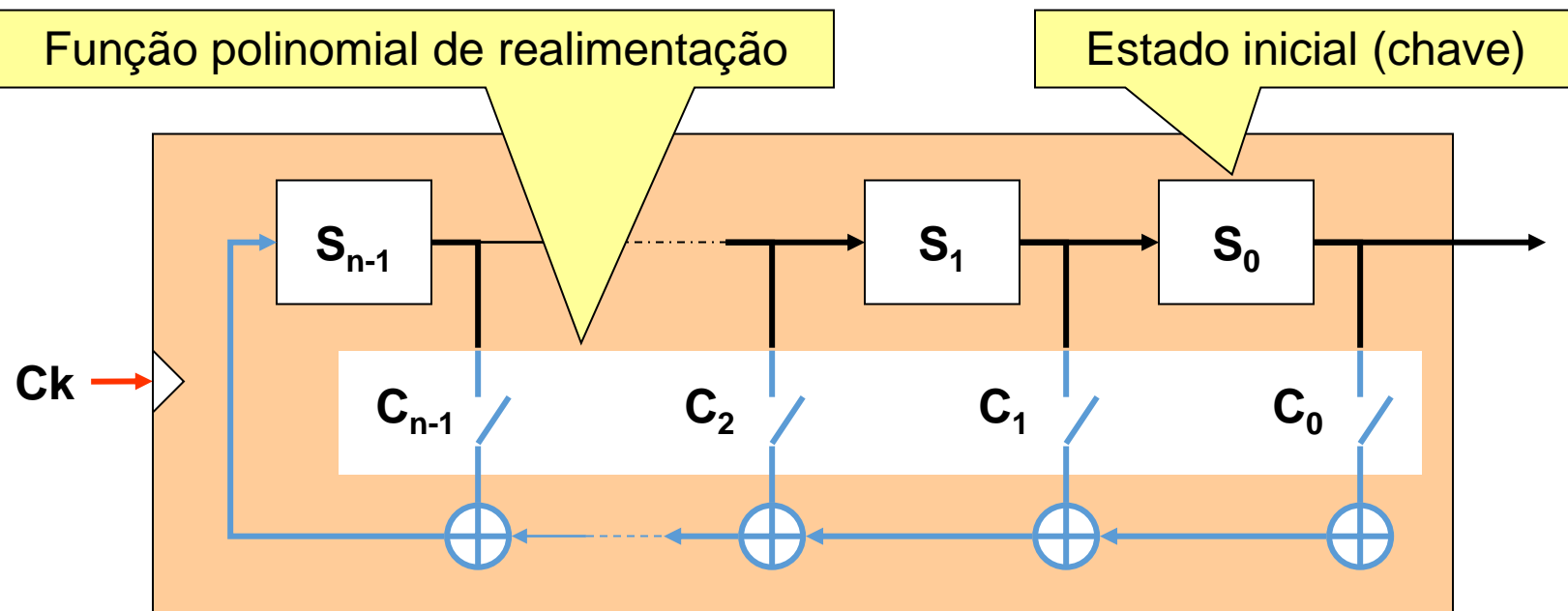
- **Aproximações usadas**

- Desenho de geradores pseudo-aleatórios seguros
 - Baseados em LFSRs
 - Baseados em cifras por blocos
 - Outras aproximações (famílias de funções, etc.)
- Normalmente são síncronas
 - Não possuem sincronização inerente, mas obrigam a que emissor/recetor estejam sincronizados.
- Normalmente sem possibilidade de acesso aleatório rápido

- **Algoritmos mais comuns**

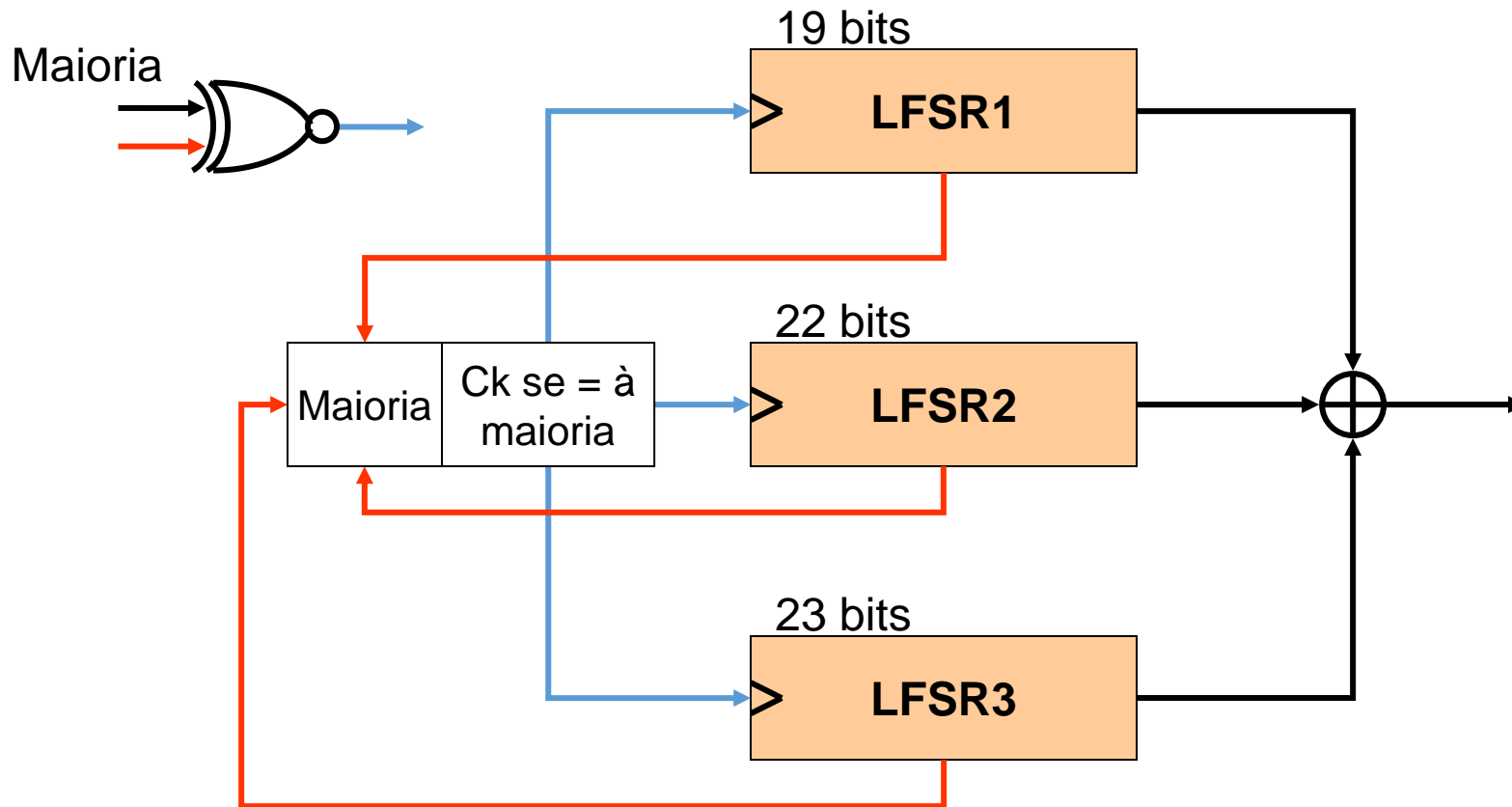
- A5/1 (US, Europe), A5/2 (GSM)
- RC4 (802.11 WEP/TKIP, etc.)
- E0 (Bluetooth BR/EDR)
- SEAL (c/ acesso aleatório uniforme)
- Chacha20
- Salsa20

Linear Feedback Shift Register (LFSR)



- **$2^n - 1$ sequências não nulas**
 - Se uma delas possuir um período $2^n - 1$ então todas o têm
- **Funções de realimentação primitivas (polinomiais primitivos)**
 - Todas as sequências não nulas têm comprimento $2^n - 1$

Geradores com composições de LFSR: A5/1 (GSM)



Cifras Simétricas por Blocos

- **Aproximações usadas**

- Blocos de grande dimensão, >128bits.

- **Difusão, confusão**

- Permutação, substituição, expansão, compressão
- Redes de Feistel com múltiplas iterações
 - $L_i = R_{i-1}$ $R_i = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i)$
- Ou redes de substituição-permutação

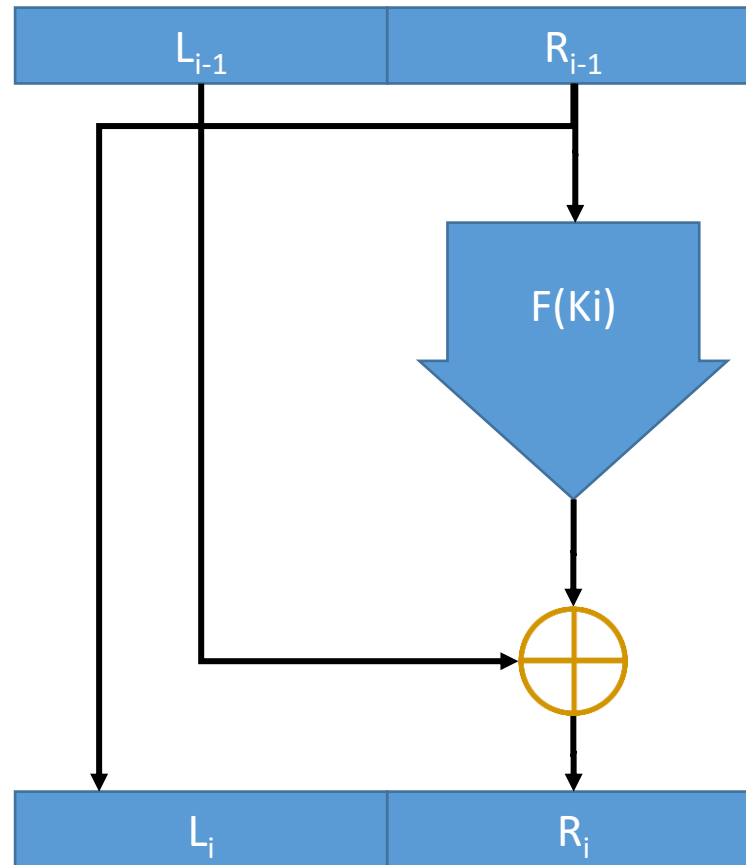
- **Algoritmos mais usados**

- **DES** (Data Enc. Stand.), **D=64; K=56**
- **IDEA** (Int. Data Enc. Alg.), **D=64; K=128**
- **AES** (Adv. Enc. Stand., aka Rijndael), **D=128, K=128, 192, 256**
- Outros (Blowfish, CAST, RC5, etc.)

Redes de Feistel

$$L_i = R_{i-1}$$

$$R_i = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i)$$

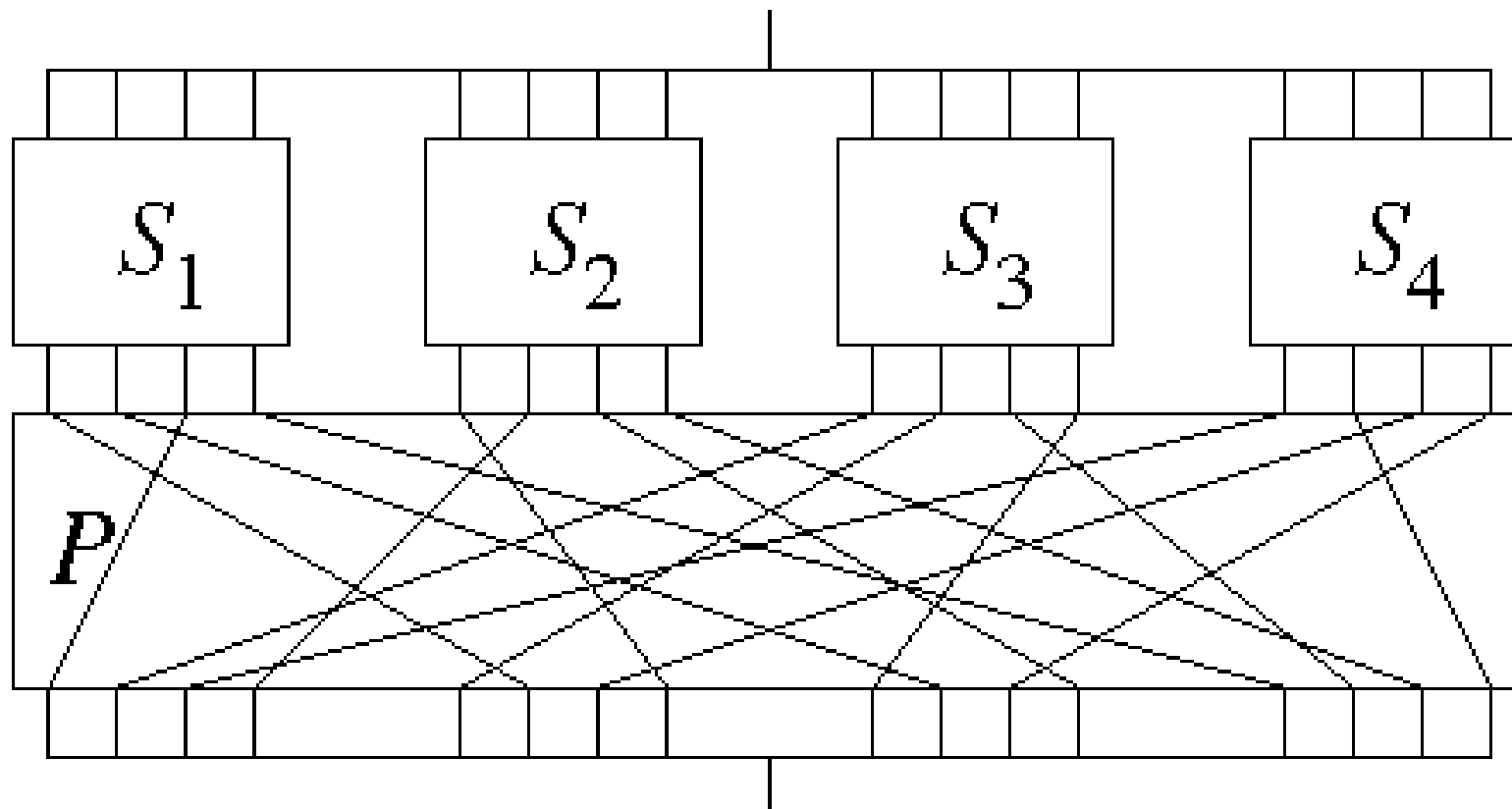


Redes de Substituição-Permutação

- **S-Box: (Substituição)** baseado num bit da entrada, troca bits da saída
 - substituição não é direta (1 para 1)
 - ideal: alteração de um bit provoca a alteração de todos os bits
 - prática: a alteração de um bit provoca a alteração de pelo menos metade dos bits
- **P-Box: (Permutação)** - permuta a posição de bits entre entrada e saída
 - ideal: permuta a posição de todos os bits

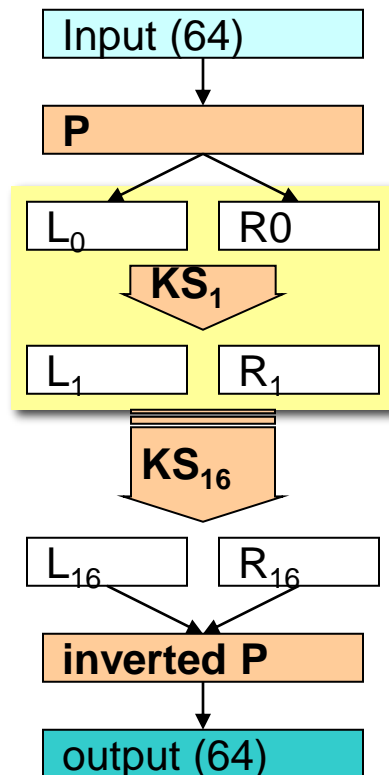
Operação de ambas depende da chave

Redes de Substituição-Permutação

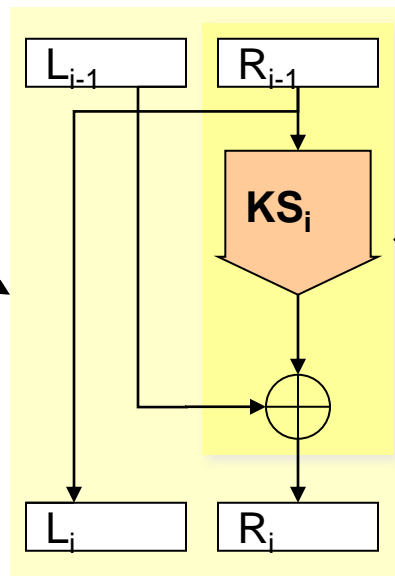


DES: Data Encryption Standard

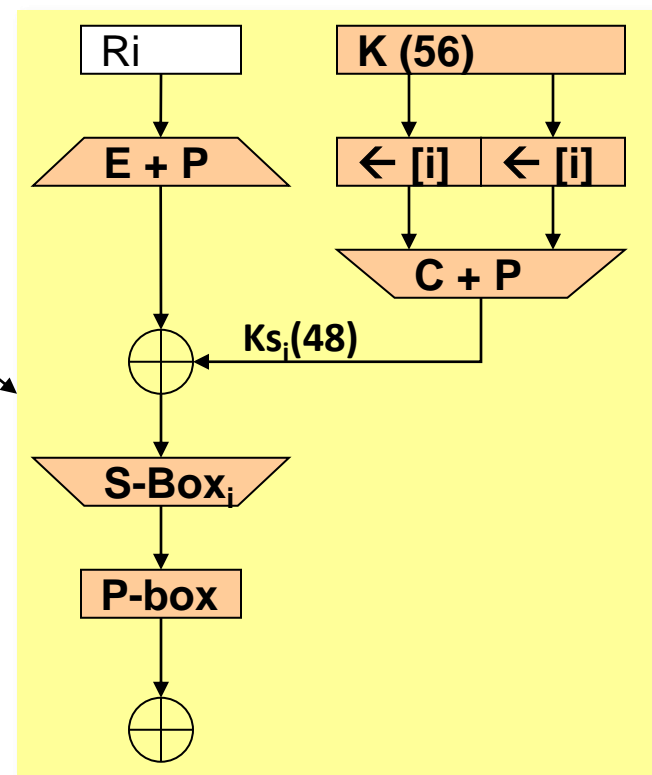
Permutações
& Iterações



Redes de
Feistel



Substituição (S-boxes),
Permutação (P-Boxes),
Expansão, Compressão



DES: robustez

- **Escolha de chaves**

- A maioria dos valores de 56 bits são adequados
- Mas... existem 4 chaves fracas, 12 semi-fracas e 48 quasi-fracas
 - Produzem K_s semelhantes (1 K_s , 2 K_s ou 4 K_s)
- Fáceis de identificar e de evitar

- **Ataques conhecidos**

- Pesquisa exaustiva (possível na prática com chaves de 56 bits)

- **Dimensão das chaves: 56 bits são atualmente insuficientes**

- A pesquisa exaustiva é técnica e economicamente viável

- **Solução: cifra múltipla**

- Cifra dupla não é completamente segura (teoricamente ...)
- Cifra tripla: 3DES (Triple-DES)
 - Com duas ou três chaves
 - Chaves equivalentes de 112 ou 168 bits
 - Usando a mesma chave, o algoritmo é compatível com o DES

Utilização de cifras por blocos: Modos

- **Processam texto em blocos de bits**
 - Texto **tem de ser múltiplo** do tamanho do bloco
 - Na prática: $\text{size}(\text{cryptogram}) \geq \text{size}(\text{plaintext})$
- **Podem aplicar mecanismos de difusão e confusão**
 - Dentro de cada bloco
 - Mas podem ser usadas como cifras contínuas
- **Método de cifra mais comum**
 - Especialmente para objetos discretos (ficheiros, documentos)
- **Cifra mais popular: AES**

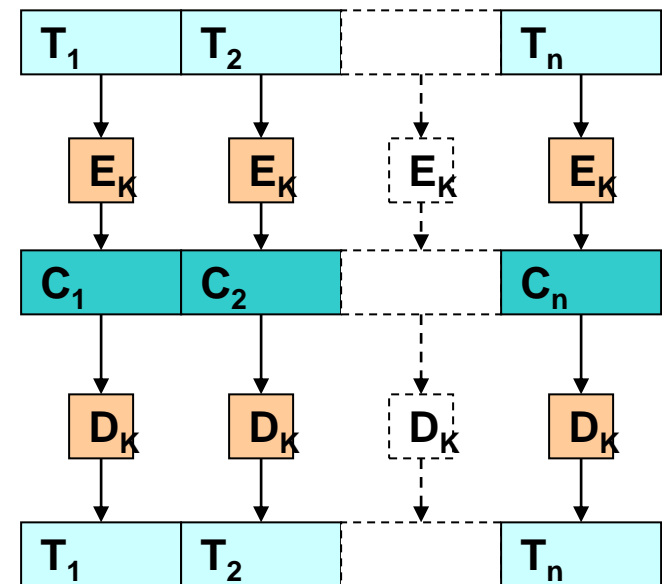
Utilização de cifras por blocos: Modos

- **Propostos inicialmente para o DES**
 - ECB (Electronic Code Block)
 - CBC (Cipher Block Chaining)
 - OFB (Output Feedback Mode)
 - CFG (Cipher Feedback Mode)
- **Modos podem ser usados com outras cifras (em teoria)**
- **Podem existir outros modos:**
 - CTR (Counter Mode)
 - GCM (Galois/Counter Mode)
 - Tweaks...

Modos: Electronic Code Block

- Cifra direta de cada bloco: $C_i = E_k(T_i)$
- Decifra direta de cada bloco: $T_i = D_k(C_i)$
- Blocos são independentes
 - Sem feedback
- Problema:

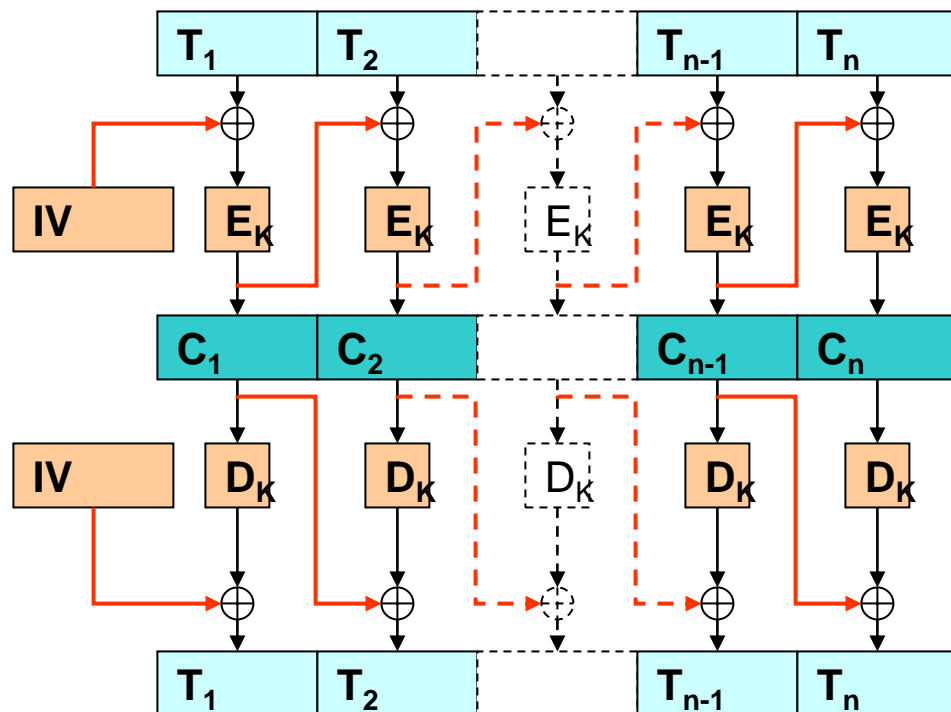
se $T_1 = T_2$ então $C_1 = C_2$



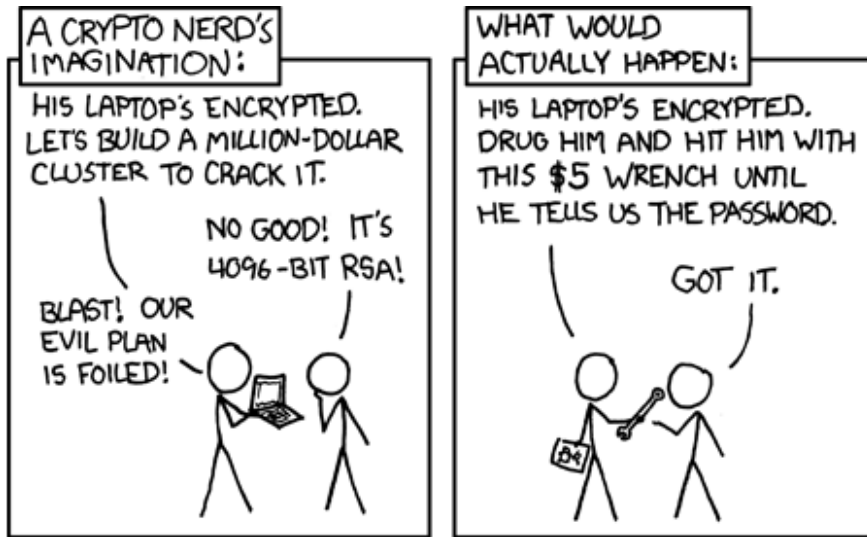
Modos: Cipher Block Chaining (CBC)

- Cifra de cada bloco T_i com feedback de C_{i-1}
 - $C_i = E_K(T_i \oplus C_{i-1})$
- Decifra de cada bloco C_i com feedback de C_{i-1}
 - $T_i = D_K(C_i) \oplus C_{i-1}$

- Bloco inicial usa IV
 - Initialization Vector
 - Valor aleatório único
 - Pode estar em claro

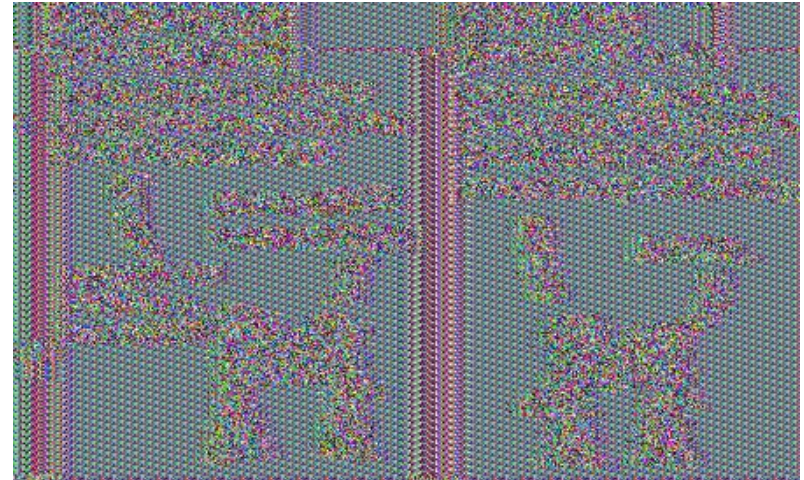


ECB vs CBC: Propagação de Padrões

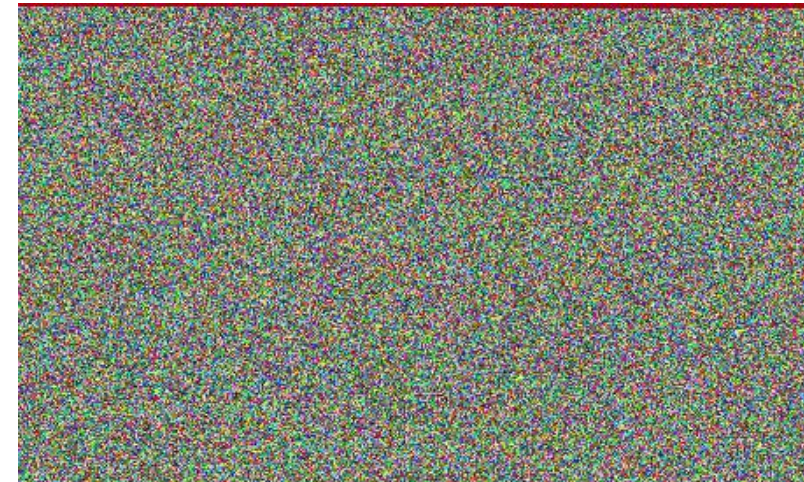


<https://xkcd.com/538/>

ECB



CBC



Modos: ECB/CBC problemas de alinhamento

- **Modos ECB/CBC necessitam de textos com dimensão múltipla da dimensão do bloco**
 - Cifra é aplicada por blocos de texto
- **Blocos incompletos (o último) necessitam de tratamento diferenciado**
 - na cifra e na decifra
- **Resultado é um bloco**
 - Criptograma **pode ser maior** do que o texto em claro

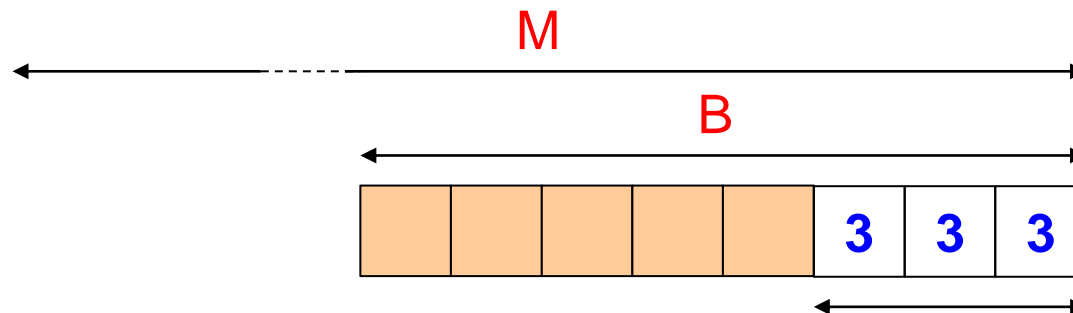
Modos: ECB/CBC problemas de alinhamento

- Alternativa: Excipiente (Padding)

- PKCS #7

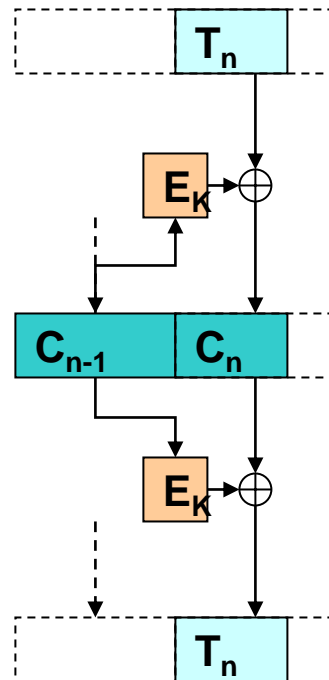
- $X = B - (M \bmod B)$
- X bytes extra, com valor X
- Se $M \bmod B = 0$, adicionar um bloco inteiro com valor B

Modo;
se não for
necessário padding
é adicionado no
mesmo bloco
com valores 16.



Modos: ECB/CBC problemas de alinhamento

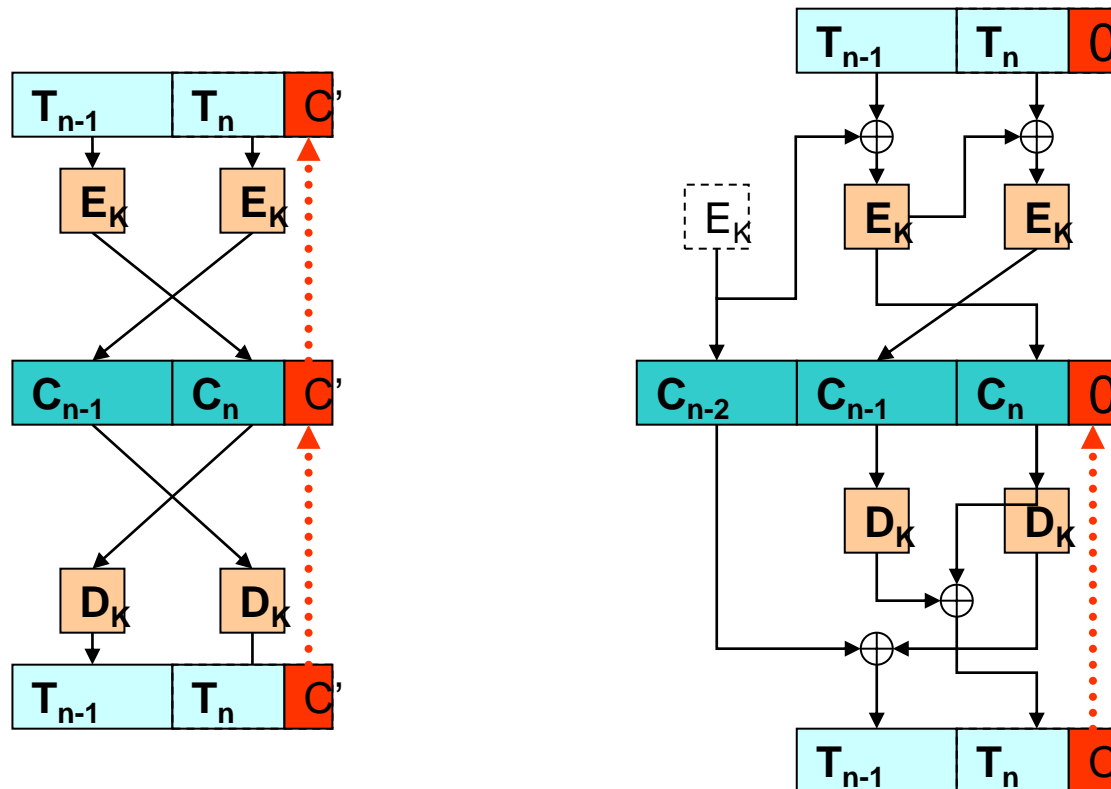
- **Cifrar o último bloco de forma diferenciada**
 - usar um processo semelhante a uma cifra contínua



Modos: ECB/CBC problemas de alinhamento

- **Ciphertext Stealing**

- Troca ordem de cifra/decifra dos dois últimos blocos
 - a) Usa parte do criptograma do penúltimo para preencher último
 - b) Usa excipiente fixo e cifra contínua antes de cifra por blocos



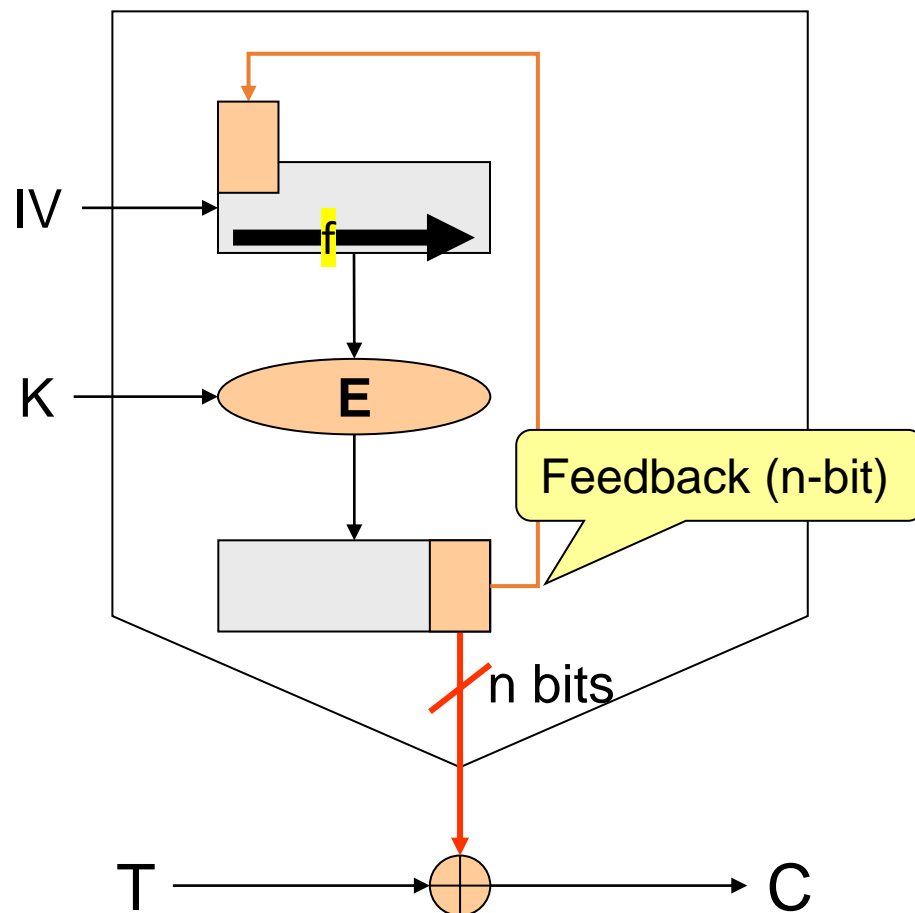
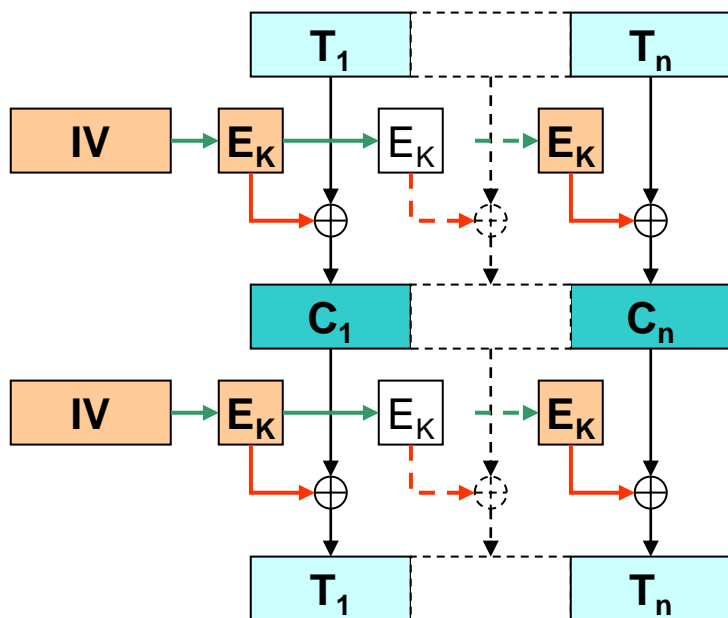
Modos: n-bit OFB (Output Feedback)

$$C_i = T_i \oplus E_K(S_i)$$

$$T_i = C_i \oplus E_K(S_i)$$

$$S_i = f(S_{i-1}, E_K(S_{i-1}))$$

$$S_0 = IV$$



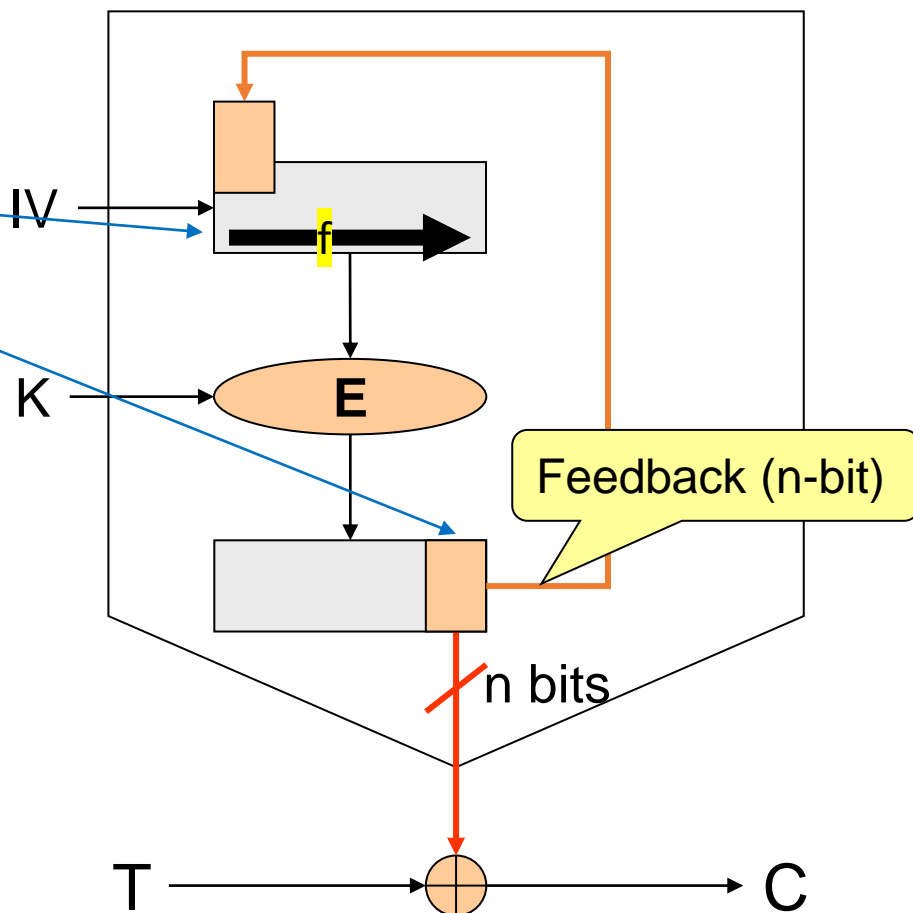
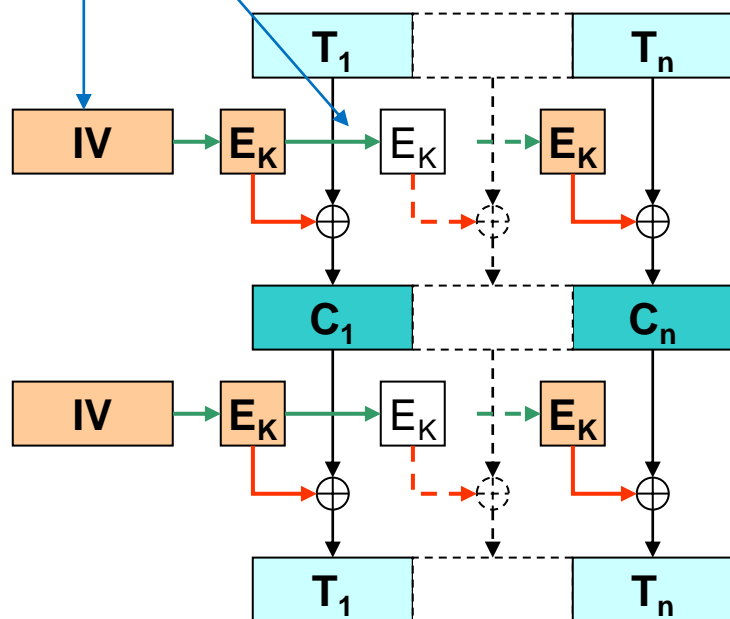
Modos: n-bit OFB (Output Feedback)

$$C_i = T_i \oplus E_K(S_i)$$

$$T_i = C_i \oplus E_K(S_i)$$

$$S_i = f(S_{i-1}, E_K(S_{i-1}))$$

$$S_0 = IV$$



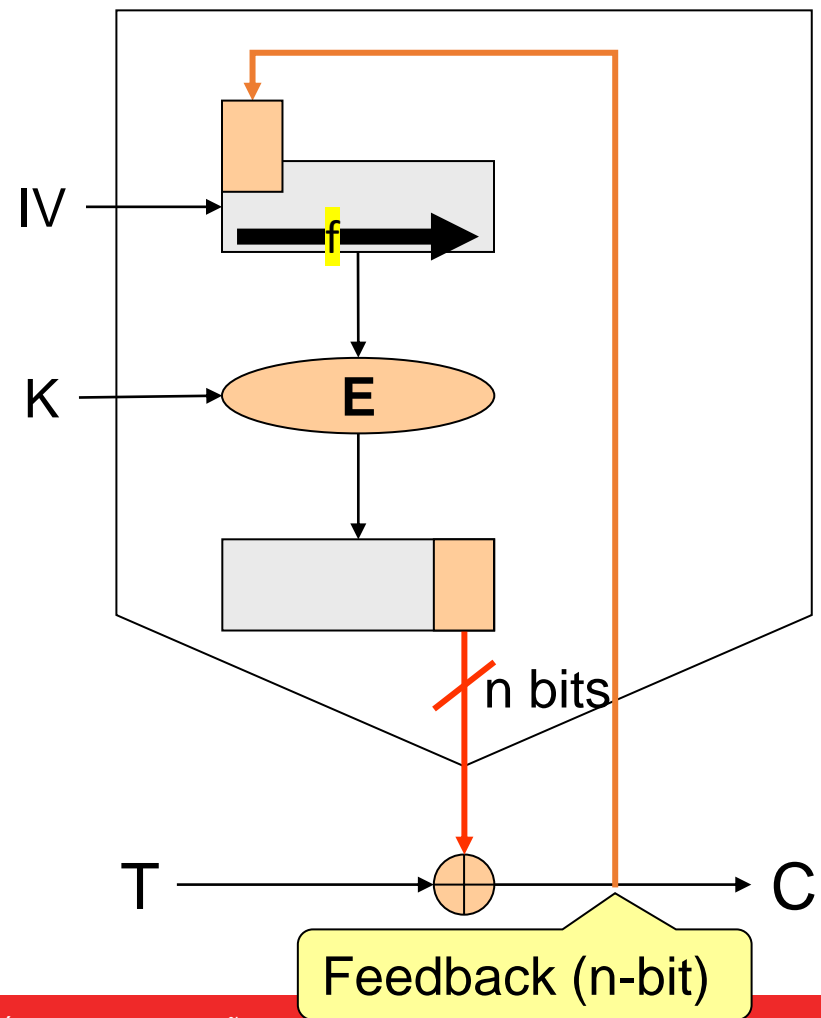
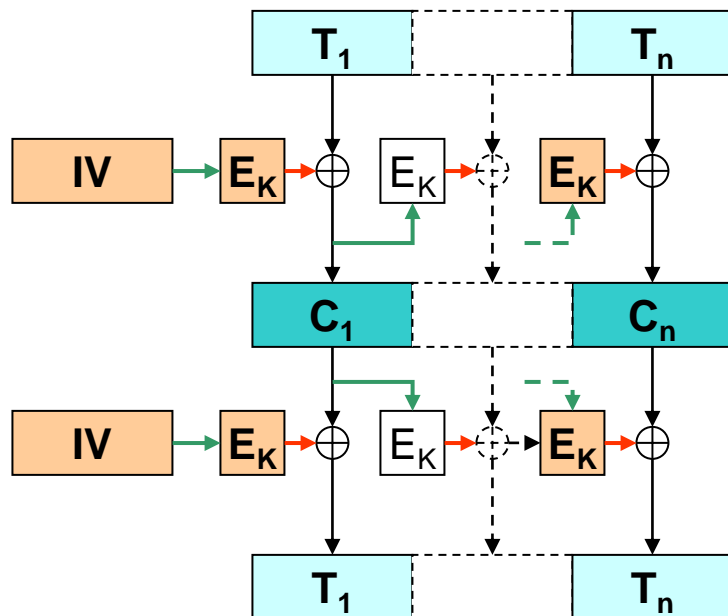
Modos: n-bit CFB (Ciphertext Feedback)

$$C_i = T_i \oplus E_K(S_i)$$

$$T_i = C_i \oplus E_K(S_i)$$

$$S_i = f(S_{i-1}, C_i)$$

$$S_0 = IV$$



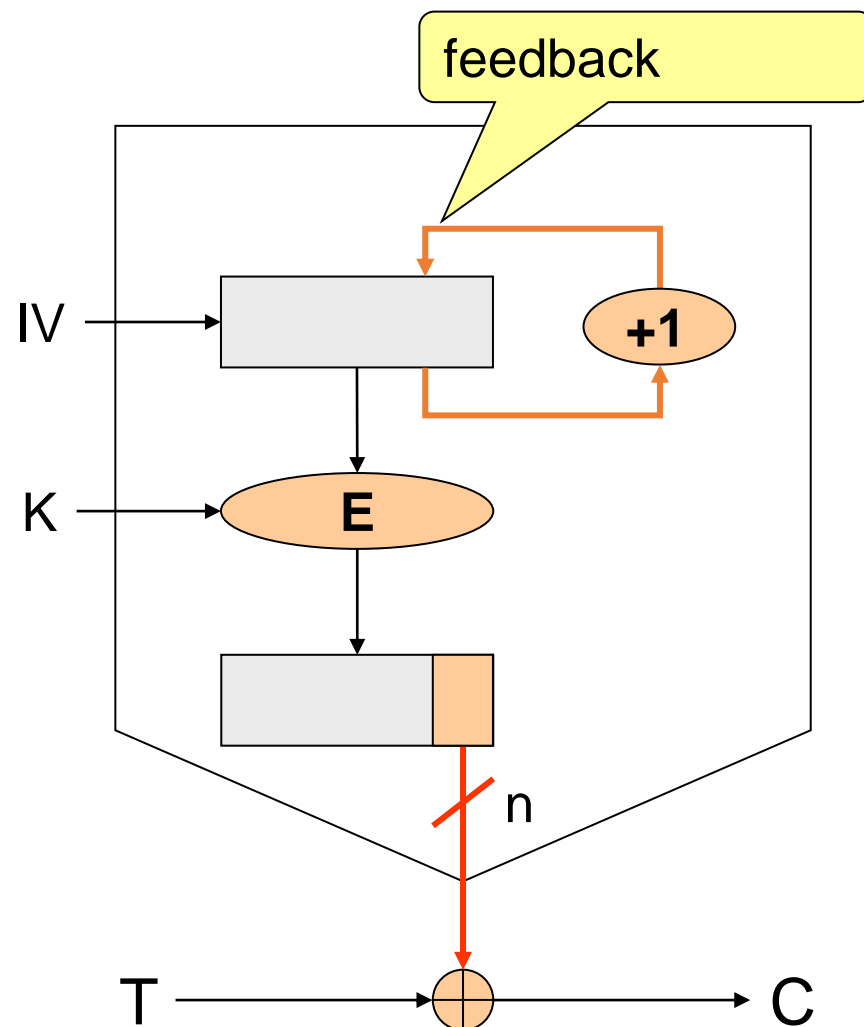
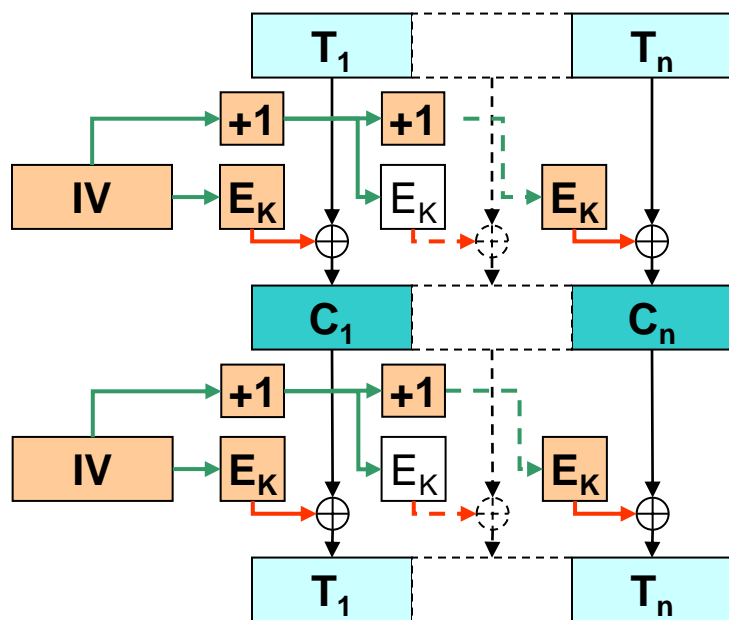
Modos: n-bit CTR (Counter)

$$C_i = T_i \oplus E_K(S_i)$$

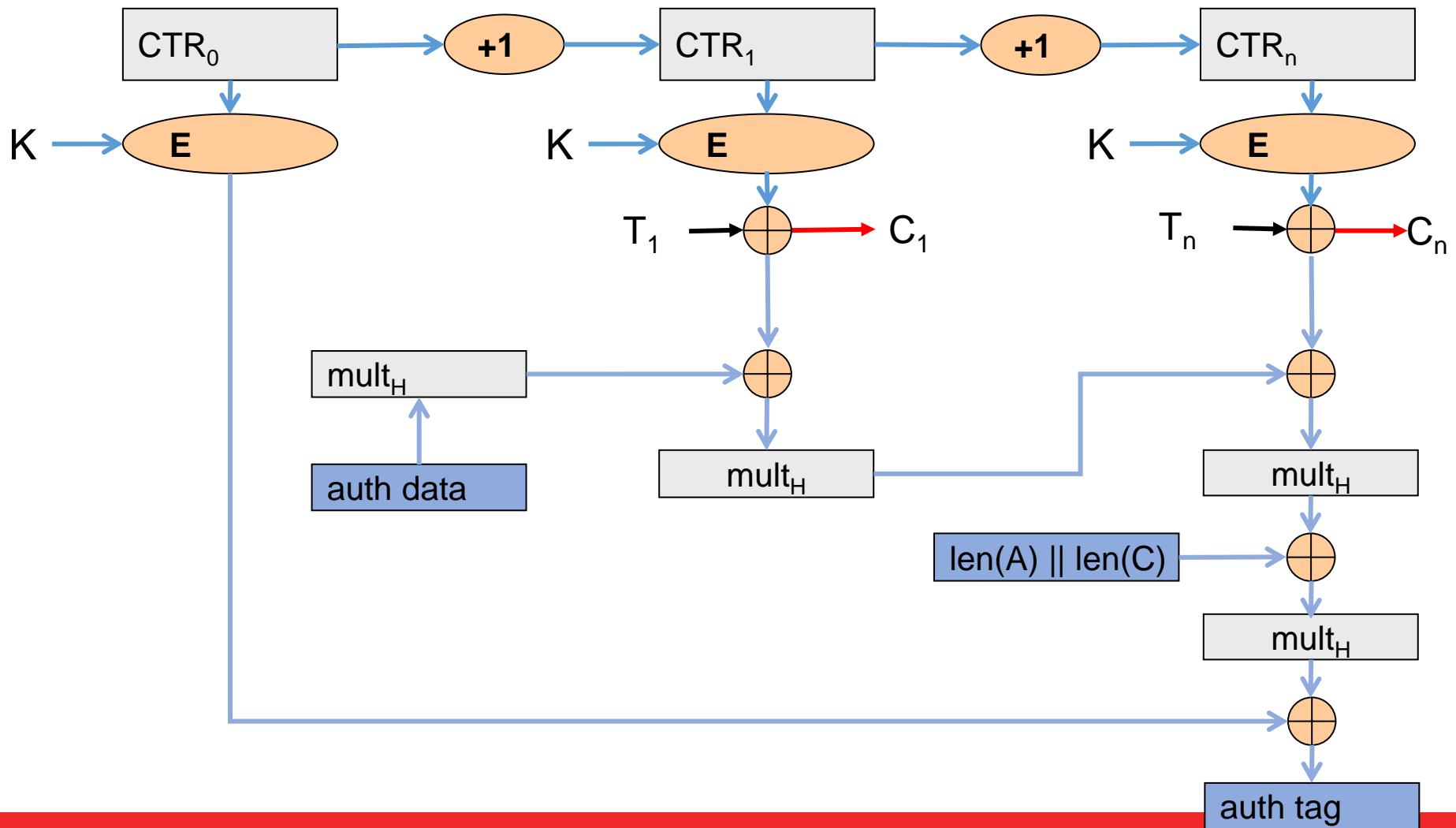
$$T_i = C_i \oplus E_K(S_i)$$

$$S_i = S_{i-1} + 1$$

$$S_0 = IV$$



Modos: Galois w/ Counter Mode (GCM)



Modos: Comparação

	Bloco		Contínua (Stream)			
	ECB	CBC	OFB	CFB	CTR	GCM
Ocultação de padrões no texto		✓	✓	✓	✓	✓
Confusão na entrada da cifra		✓		✓	Contador Secreto	Contador Secreto
Mesma chave para mensagens diferentes	✓	✓	Outro IV	Outro IV	Outro IV	Outro IV
Dificuldade de alteração	✓	✓ (...)				✓
Pré-processamento			✓		✓	✓
Paralelização	✓	decifra	com pré. proc.	decifra	✓	✓
Acesso aleatório uniforme						
Propagação de erros		próximo bloco		alguns bits seguintes		detetado
Capacidade de re-sincronização	perda de blocos	perda de blocos		perda de múltiplos n-bits		detetado

Modos: Reforço da Segurança

Cifra Múltipla

- **Cifra dupla**

- Violável por intromissão em 2^{n+1} tentativas
 - Com 2 ou mais blocos de texto conhecido
 - Usando 2^n blocos de memória ...
- Não é (teoricamente) muito mais segura ...

- **Cifra tripla (EDE):** $C_i = E_{K_1}(D_{K_2}(E_{K_3}(T_i)))$ $P_i = D_{K_3}(E_{K_2}(D_{K_1}(C_i)))$

- Normalmente usa-se $K_1=K_3$
- Se $K_1=K_2=K_3$ transforma-se numa cifra simples

Modos: Reforço da Segurança (Cifra dupla)

Ataque Meet in The Middle

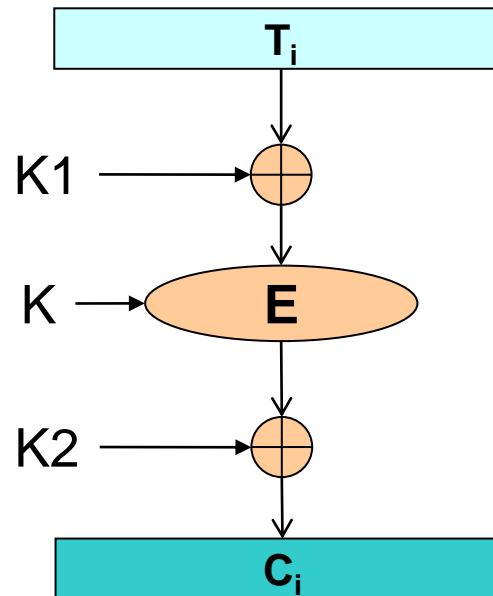
- **Cifra dupla com duas chaves K_a e K_b**
 - $C = E_b(k_b, E_a(k_a, T))$
 - $T = D_a(k_a, D_b(k_b, C))$
 - Logo: $D_b(k_b, C) = E_a(k_a, T)$
- **Se C e T forem conhecidos, podem-se calcular:**
 - Todos os valores $D_b(k_b, C)$, variando K_b
 - Todos os valores $E_a(k_a, T)$, variando K_a
- **Chaves encontradas quando se verificar a igualdade**
 - Complexidade esperada: $2^{\text{len}(k_a) + \text{len}(k_b)}$
 - Complexidade real: $2^{\text{len}(k_a)} + 2^{\text{len}(k_b)}$
 - Exemplo para chaves de 56 bits: $2^{56+56} = 2^{112}$ vs $2^{56} + 2^{56} = 2^{57}$
 - Consumindo 2^{56} bits de armazenamento (8 PiB)

Modos: Reforço da Segurança

Branqueamento/whitening

Técnica simples e eficiente de introdução de confusão

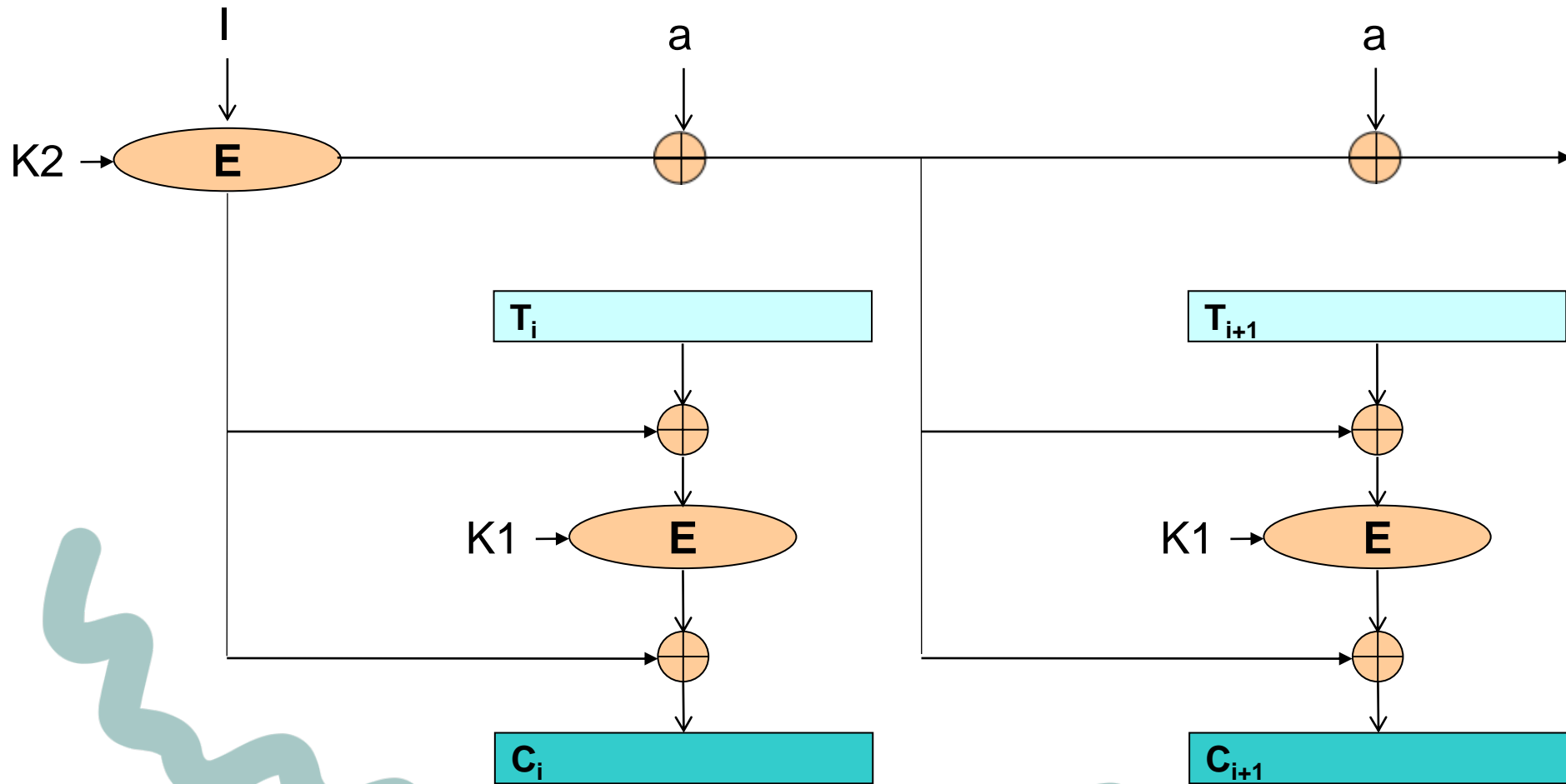
- $C_i = E_K(K_1 \oplus T_i) \oplus K_2$
- $T_i = K_1 \oplus D_K(K_2 \oplus C_i)$



Modos: Reforço da Segurança

XOR-Encrypt-XOR (XEX)

XTS = XEX + Ciphertext Stealing



Cifras Assimétricas por Blocos

- **Par de chaves**

- Uma privada, pessoal e intransmissível
- Uma pública, disponível para todos

- **Permitem**

- Confidencialidade sem troca de segredos
- Autenticação de conteúdos (**integridade**) e de autoria (**assinaturas digitais**)

Cifras Assimétricas por Blocos

- **Desvantagens**

- Desempenho (normalmente pouco eficientes)

- **Vantagens**

- Interação com N interlocutores requer apenas N pares de chaves
 - Cifra por blocos simétrica iria requerer N^2

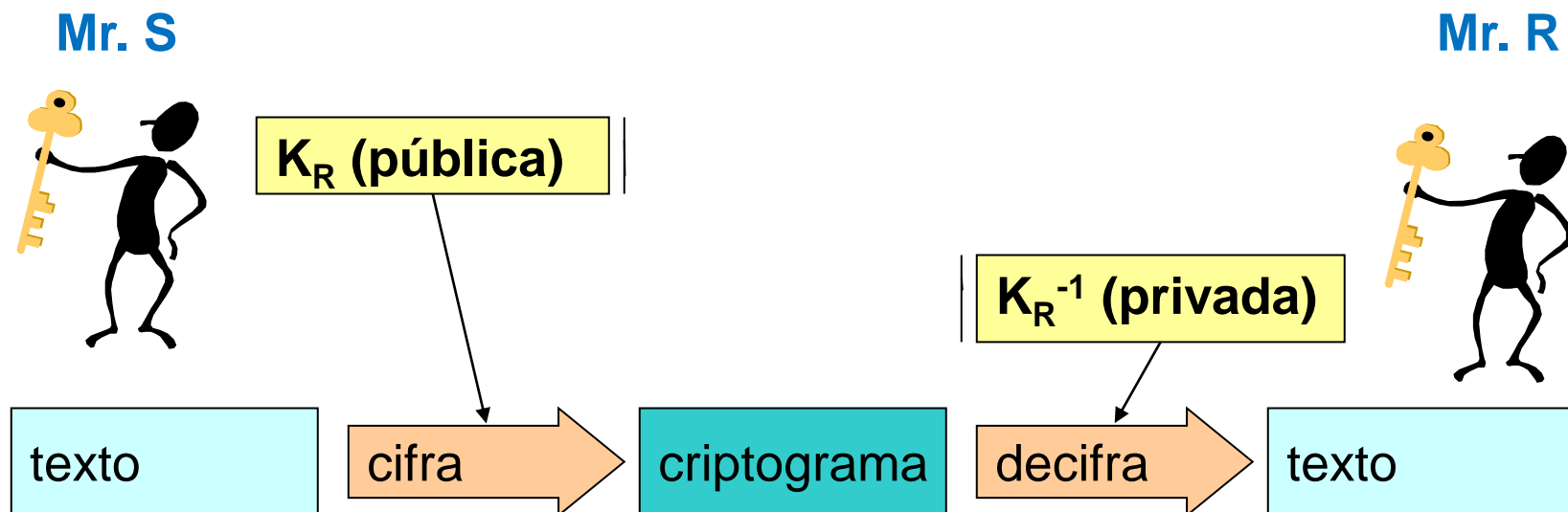
- **Problemas**

- Distribuição de chaves públicas (têm de ser distribuídas à priori)
- Tempo de vida dos pares de chaves (têm de expirar)

Cifras Assimétricas por Blocos

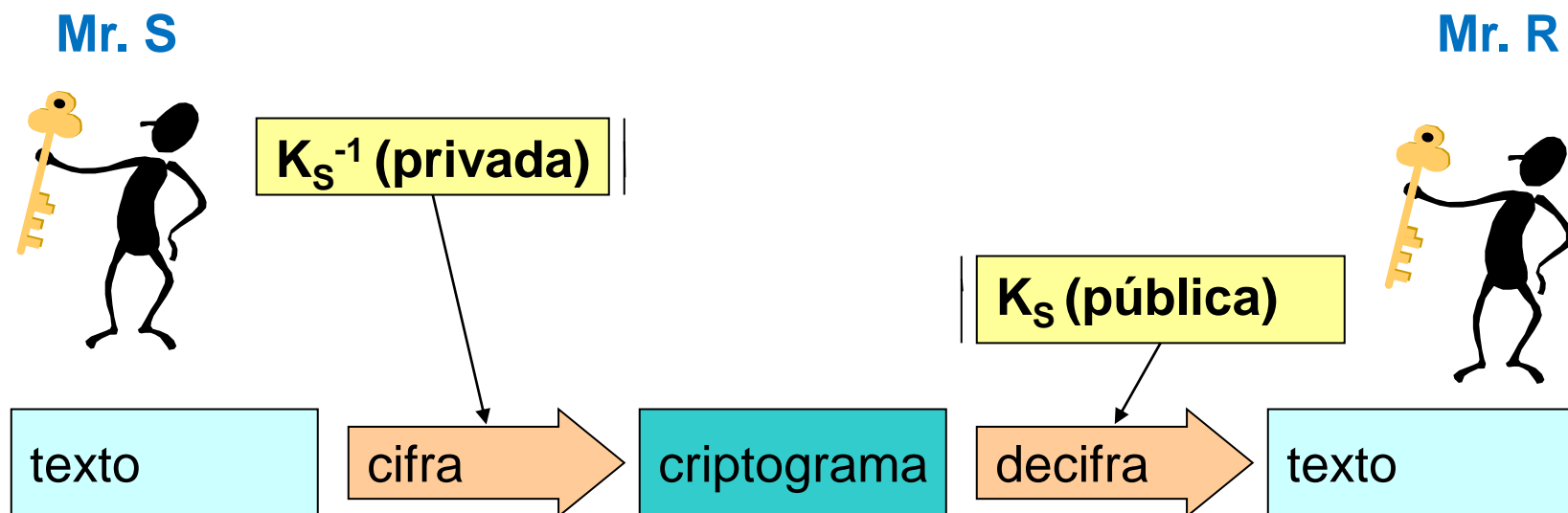
- **Aproximações: complexidade matemática**
 - Cálculo de logaritmos discretos
 - Fatorização de grandes números
 - Problema da mochila (knapsack)
- **Algoritmos mais usados**
 - RSA
 - ElGamal
 - Curvas elípticas (Elliptic Curve Cryptography, ECC)
- **Outras técnicas com chave pública**
 - Diffie-Hellman (negociação de chaves)

Confidencialidade c/ Cif. Assimétricas



- **Menos chaves**
 - $C = E(K, P)$ $P = D(K^{-1}, C)$
 - Para ter confidencialidade basta **Y** conhecer a chave pública de **R** (K_R)
- **Não há autenticação de origem**
 - **R** não sabe quem produziu o criptograma
 - Se K_R for efetivamente pública, qualquer um o pode fazer

Autenticidade c/ Cif. Assimétricas



- **O criptograma não pode ser alterado**
 - $C = E(K^{-1}, P)$ $P = D(K, C)$;
 - Só **S** conhece a chave K_S^{-1} com que o criptograma foi gerado
- **Não há confidencialidade**
 - Quem conhecer K_S decifra o criptograma
 - Se K_S for verdadeiramente pública, qualquer um o pode fazer

RSA (Rivest, Shamir, Adelman) 1978

- **Complexidade matemática**

- Dificuldade de Fatorização de grandes números
- Dificuldade de cálculo de logaritmos discretos

- **Operações e chaves**

- $K = (e, n)$ $K^{-1} = (d, n)$
 - $C = P^e \bmod n$ $P = C^d \bmod n$
 - $C = P^d \bmod n$ $P = C^e \bmod n$

- **Escolha dos valores das chaves**

- n de grande dimensão (centenas ou milhares de bits)
- $n = p \times q$ p e q primos, de grande dimensão
- Escolher e coprimo de $(p-1) \times (q-1)$
- Procurar um d tal que $e \times d \equiv 1 \bmod (p-1) \times (q-1)$
- Não se consegue deduzir d a partir de e ou de n

RSA (Rivest, Shamir, Adelman) 1978

- **$p = 5$ $q = 11$** (pequenos números primos)
 - $n = p \times q = 55$
 - $(p-1)(q-1) = 40$
- **$e = 3$**
 - Coprimo de 40
- **$d = 27$**
 - $e \times d \equiv 1 \pmod{40}$
- **$P = 26$** (note que $P, C \in [0, n-1]$)
 - $C = P^e \pmod{n} = 26^3 \pmod{55} = 31$
 - $P = C^d \pmod{n} = 31^{27} \pmod{55} = 26$

Diffie-Hellman

alice



bob

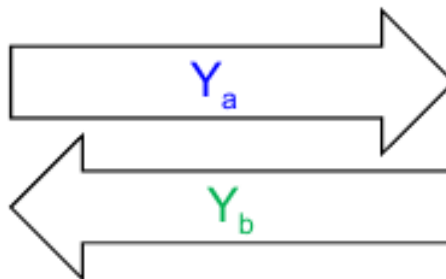


q (primo de elevada dimensão)
 α (raiz primitiva mod q)

a = random

$$Y_a = \alpha^a \text{ mod } q$$

$$K_{ba} = Y_b^a \text{ mod } q$$



b = random

$$Y_b = \alpha^b \text{ mod } q$$

$$K_{ab} = Y_a^b \text{ mod } q$$

$$K_{ba} = K_{ab}$$

Diffie-Hellman - Ataque por MitM

alice



$a = \text{random}$

$$Y_a = \alpha^a \bmod q$$

$$K_{ca} = Y_c^a \bmod q$$

mallory



$c = \text{random}$

$$Y_c = \alpha^c \bmod q$$

$$K_{ac} = Y_a^c \bmod q$$

$$K_{cb} = Y_b^c \bmod q$$

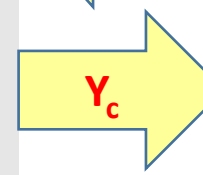
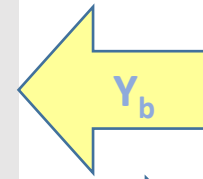
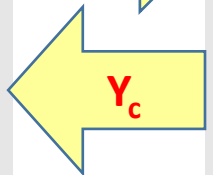
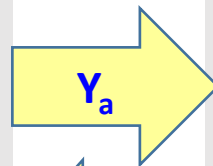
bob



$b = \text{random}$

$$Y_b = \alpha^b \bmod q$$

$$K_{cb} = Y_c^b \bmod q$$



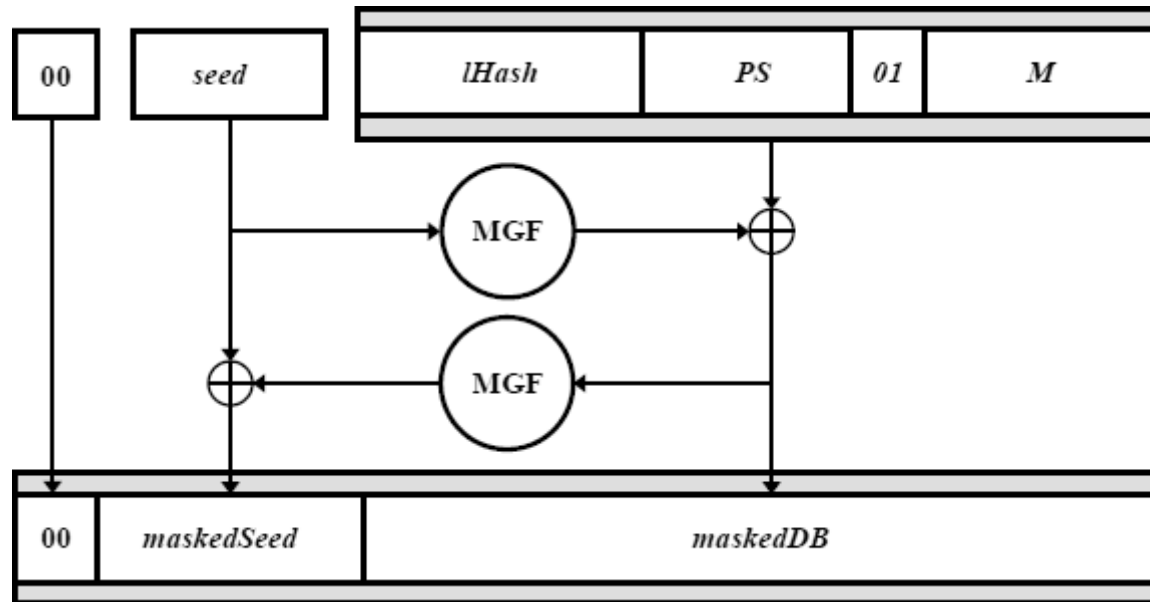
Randomização de cifras com chave pública

- O resultado de uma cifra com chave pública não deverá ser determinístico (previsível)
 - **N** cifras do mesmo valor, com a mesma chave, devem produzir **N** resultados diferentes
 - Objetivo: impedir a descoberta de valores cifrados por tentativa e erro
- Técnicas
 - Concatenação do valor a cifrar com dois valores
 - Um fixo (para controlo de erros)
 - Um aleatório (para randomização)

Randomização de cifras com chave pública: OEAP

Optimal Asymmetric Encryption Padding

- IHash: Digest sobre Label
- seed: Valor aleatório
- PS: zeros
- M: Texto
- MGF: Mask Generation Function



Aumento de performance: Cifra Híbrida

- **Combinação de Cifra Assimétrica com Simétrica**

- Usar o melhor de dois mundos, evitando os problemas
- Cifra Assimétrica: utilização de chaves públicas (**mas lenta**)
- Cifra Simétrica: Rápida (**mas com fraca troca de chaves**)

- **Aproximação:**

1. Obter K_{pub} do destinatário
2. Gerar K_s de forma **aleatória**
3. Calcular $C_1 = E_{sym}(K_s, T)$
4. Calcular $C_2 = E_{asym}(K_{pub}, K_s)$
5. Enviar $C_1 + C_2$
 - C_1 = Texto cifrado com chave simétrica
 - C_2 = Chave simétrica cifrado com chave pública do destinatário
 - Também pode conter o IV

Funções de Síntese (digest)

- **Resultado de dimensão **constante** com entradas de dimensão **variável****
 - Uma espécie de “impressão digital” dos textos
- **Resultados muito diferentes para entradas similares**
 - Funções de dispersão criptográficas unidirecionais
- **Propriedades relevantes:**
 - Resistência à descoberta de um texto
 - Dada uma síntese, é difícil encontrar um texto que o produza
 - Resistência à descoberta de um 2º texto
 - Dado um texto, é difícil encontrar um segundo texto com a mesma síntese
 - Resistência à colisão
 - É difícil encontrar dois textos com a mesma síntese
 - Paradoxo do aniversário

Funções de Síntese: Dimensão dos Textos

- **Considerando o textos semelhantes, mas diferentes:**
 - T1: “Hello User_A!”, T2: “Hello User_B!”, T3: “Hello User_XY!”
- **Diferentes algoritmos produzem valores de dimensão diferente, mas independente da dimensão do texto**
 - MD5:
 - T1: 70df836fdaf02e0dfc990f9139762541
 - T3: a08313b553d8bf53ca7457601a361bea
 - SHA-1 :
 - T1: f591aa1eabcc97fb39c5f422b370ddf8cb880fde
 - T3: c28b0520311e471200b397eaa55f1689c8866f25
 - SHA-256:
 - T1: 9649d8c0d25515a239ec8ec94b293c8868e931ad318df4ccd0df fd67aff89905
 - T3: 8fc49cde23d15f8b9b1195962e9ba517116f45661916a0f199fcf21cb686d852

Funções de Síntese: Diferença entre Textos

- **Considerando o textos semelhantes, mas diferentes:**
 - T1: “Hello User_A!”, T2: “Hello User_B!”, T3: “Hello User_XY!”
- **Uma pequena alteração no texto (1 bit) produz uma alteração drástica no resultado**
 - MD5:
 - T1: 70df836fdaf02e0dfc990f9139762541
 - T2: c32e0f62a7c9c815063d373acac80c37
 - SHA-1 :
 - T1: f591aa1eabcc97fb39c5f422b370ddf8cb880fde
 - T2: bab31eb62f961266758524071a7ad8221bc8700b
 - SHA-256:
 - T1: 9649d8c0d25515a239ec8ec94b293c8868e931ad318df4ccd0df67aff89905
 - T2: e663a01d3bec4f35a470aba4baccece79bf484b5d0bffa88b59a9bb08707758a

Funções de Síntese (digest)

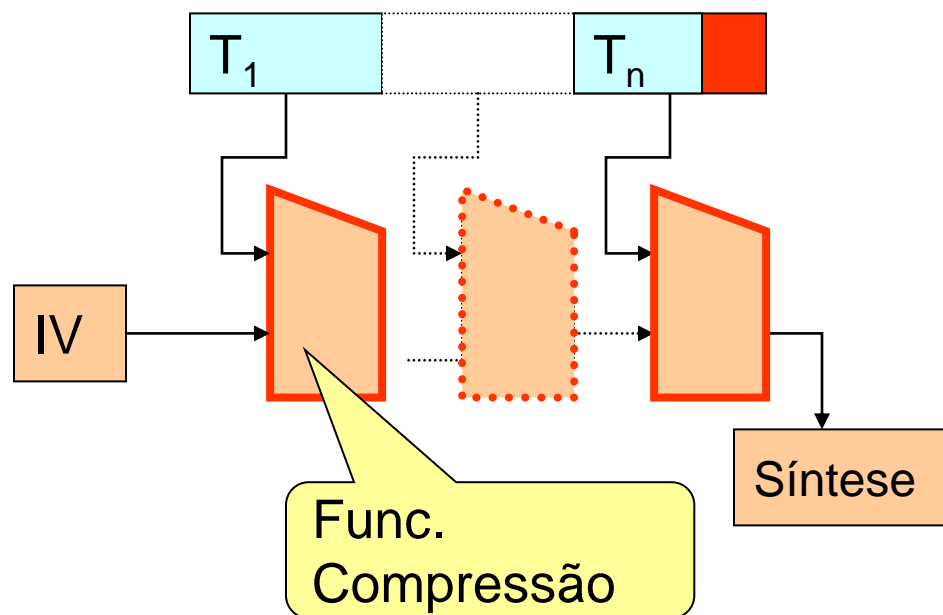
- **Aproximações**

- Difusão e confusão em funções de compressão
- Construção Merkle-Damgård
 - Compressão iterativa
 - Padding com o comprimento

- **Algoritmos mais comuns**

- MD5 (128 bits)
 - Já não é seguro! É fácil descobrir colisões!
- SHA-1 (Secure Hash Algorithm, 160 bits)
 - Já não é seguro! É fácil descobrir colisões! (em 2017)
- **SHA-2, aka SHA-256/SHA-512, SHA-3, etc.**

Funções de Síntese

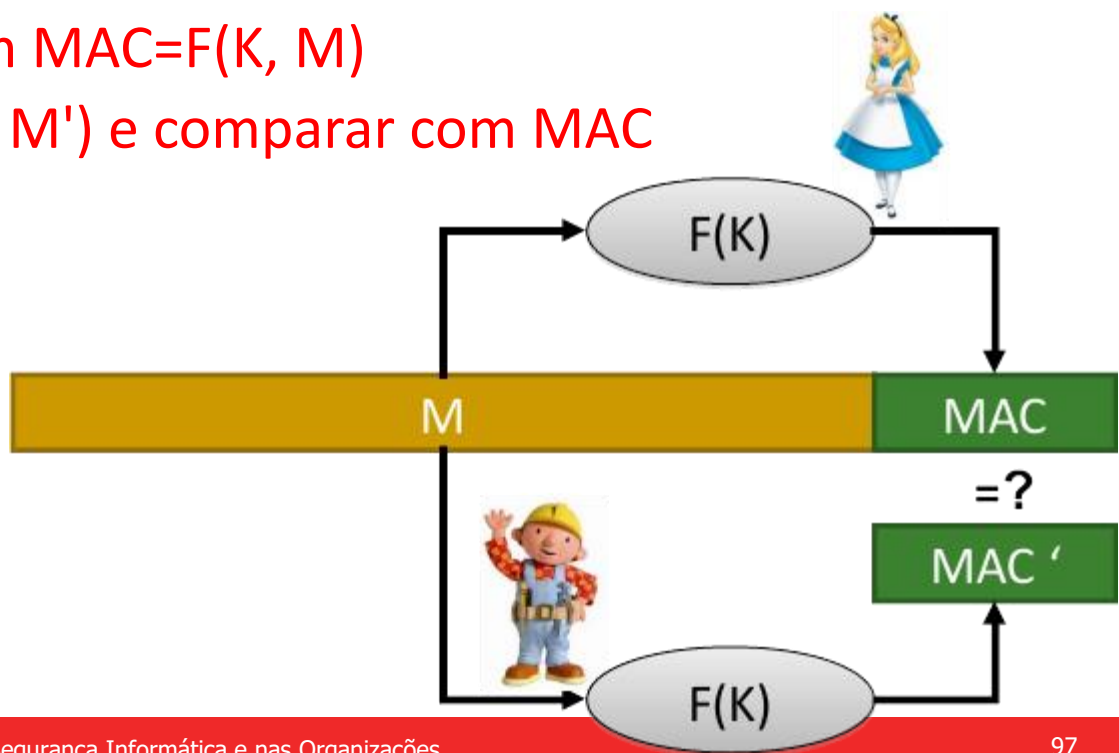


Message Integrity Code (MIC)

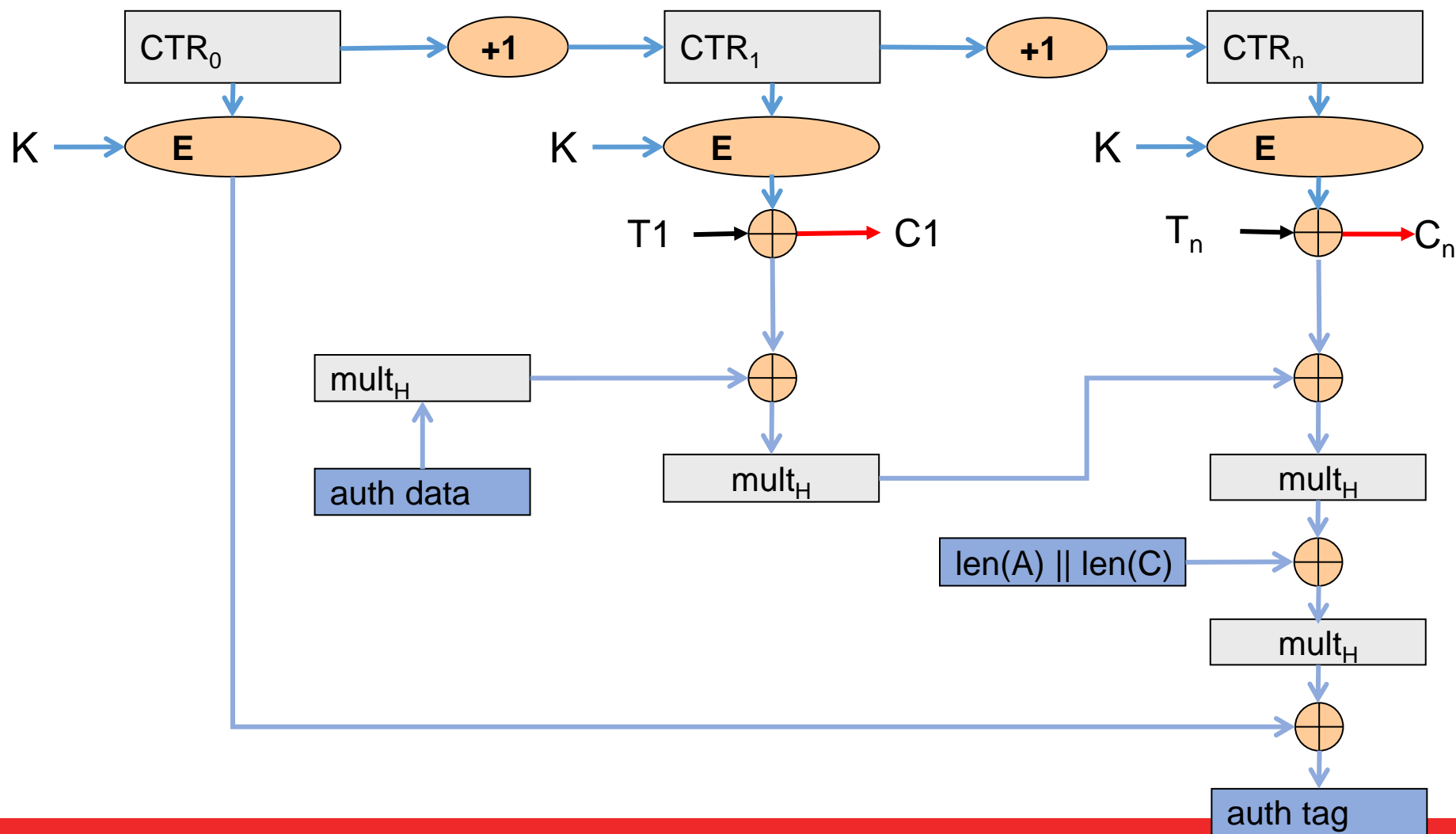
- **Fornecem capacidade de detetar alterações por máquinas**
 - Erros de comunicação/armazenamento
 - De carácter aleatório ou não controlado
- **Envio: Calcular MIC e enviar T + MIC**
 - com T =texto e MIC =síntese(T)
- **Receção: Receber dados (T') e verificar se $S(T') = MIC$**
 - Calcular $S'=síntese(T')$
 - Validar se $S(T') == MIC$
- **Não protege contra alterações deliberadas**
 - Atacante pode manipular T em T' e calcular novo MIC

Message Authentication Code (MAC)

- Síntese/digest/hash gerada com recurso **a uma chave**
 - Só os conhecedores da chave conseguem gerar/validar o MAC
- Utilizada para garantir autenticidade/integridade
 - Enviar: **$M + MAC$, com $MAC = F(K, M)$**
 - Receber: **Calcular $F(K, M')$ e comparar com MAC**



MAC: Cifras com Autenticação (GCM)



MAC: Aproximações

- **Cifrando uma síntese normal**
 - Por exemplo, com uma cifra simétrica por blocos
- **Usando uma função chaveada, realimentação e propagação de erros**
 - ANSI X9.9 (ou DES-MAC) com DES CBC (64 bits)
- **Usando uma chave nos parâmetros da função**
 - Keyed-MD5 (128 bits): MD5(K, keyfill, texto, K, MD5fill)
- **Construção HMAC: $H(K, opad, H(K, ipad, texto))$**
 - $ipad = 0x36$ B vezes, $opad = 0x5C$ B vezes
 - HMAC-MD5, HMAC-SHA, etc.

Cifra e Autenticação

- **Encrypt-then-MAC: MAC calculado do criptograma**
 - Permite verificar a integridade antes da decifra

MÁS APROXIMAÇÕES

- **Encrypt-and-MAC: MAC é calculado do texto**
 - MAC não é cifrado
 - Fornece informação acerca do texto original (se igual a outro)
- **MAC-then-Encrypt: MAC é calculado do texto**
 - MAC é cifrado
 - Obriga a decifra completa antes da validação do MAC
 - Erros só são detetados após a decifra e validação

Assinaturas Digitais

- **Autenticam o conteúdo de documentos**
 - Garantem a sua integridade
- **Autenticam o autor**
 - Garantem a identidade do autor/criador
- **Previnem repudição do conteúdo**
 - Autor não pode negar a sua criação
 - só ele tem acesso à chave privada
 - Nota: autor é quem cria o conteúdo, não quem o envia

Assinaturas Digitais (aproximações)

- **Cifra Assimétrica sobre Síntese**
 - Síntese usada por questões de desempenho
 - Cifra assimétrica para garantir autenticidade

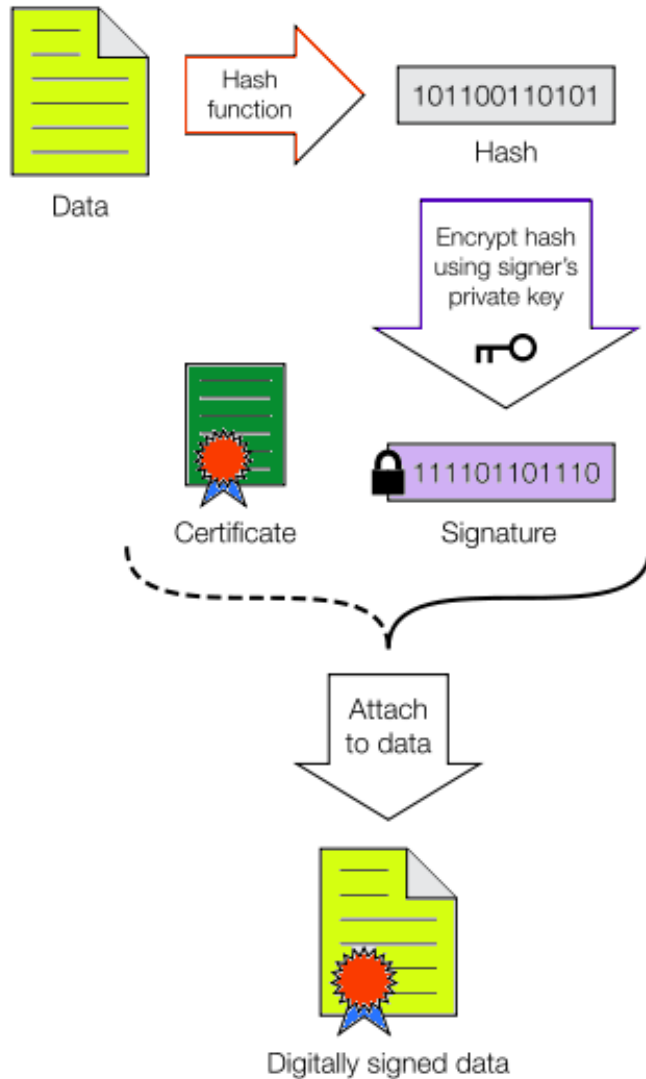
Assinar: $A_x(\text{doc}) = \text{info} + E(K_x^{-1}, \text{digest}(\text{doc} + \text{info}))$

info associada com K_x

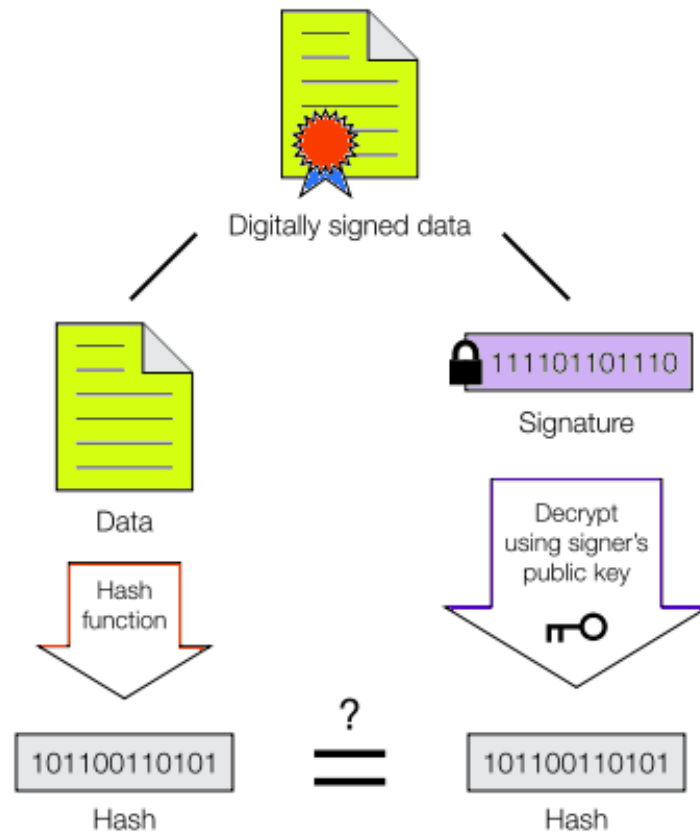
Verificar:

$$D(K_x, A_x(\text{doc})) \equiv \text{digest}(\text{doc} + \text{info})$$

Signing



Verification



If the hashes are equal, the signature is valid.

Assinatura digital num email

```
From - Fri Oct 02 15:37:14 2009
[...]
Date: Fri, 02 Oct 2009 15:35:55 +0100
From: User From <user.from@ua.pt>
Organization: UA
MIME-Version: 1.0
To: User To <user.to@ua.pt>
Subject: Teste
Content-Type: multipart/signed; protocol="application/x-pkcs7-signature"; micalg=sha1; boundary="-----ms0504050701010502050101"
```

This is a cryptographically signed message in MIME format.

```
-----ms0504050701010502050101
Content-Type: multipart/mixed;
boundary="-----060802050708070409030504"
```

This is a multi-part message in MIME format.

```
-----060802050708070409030504
Content-Type: text/plain; charset=ISO-8859-1
Content-Transfer-Encoding: quoted-printable
```

Corpo do mail

```
-----060802050708070409030504-
-----ms0504050701010502050101
Content-Type: application/x-pkcs7-signature; name="smime.p7s"
Content-Transfer-Encoding: base64
Content-Disposition: attachment; filename="smime.p7s"
Content-Description: S/MIME Cryptographic Signature
```

```
MIAGCSqGSIB3DQEHAQCAMIACAQExCzAJBgUrDgMCGGUAMIAGCSqGSIB3DQEHAQAoIIamTCC
BUkwggSyoAMCAQICBACnIaEwDQYJKoZIhvcNAQEFBQAwdTELMakGA1UEBhMCVVmxGDAWBgNV
[...]
KoZIhvcNAQEBBQAEgYCoFks852BV77NVuw53vSx01XtI2JhC1CD1u+tcTPoMD1wq5dc5v40
Tgsaw0N8dqqVLk8aC/CdGMbRBu+J1LKrcVZa+khnjtB66HhDRLrjmEGDnttrEjbbqvpd2Q02
vxB3iPT1U+vCGXo47e6GyRydqTpbq0r49Zqmx+IJ6Z7iigAAAAA==
-----ms0504050701010502050101--
```

Assinaturas cegas

- **Assinaturas pode ser efetuadas de forma cega**
 - Assinante não consegue observar os conteúdos assinados
 - Semelhante a assinar um envelope com um documento e um papel químico
- **Servem para garantir o anonimato e a não alteração da informação assinada**
 - O assinante X sabe quem lhe pede a assinatura (Y)
 - X assina T_1 , mas Y depois recupera a assinatura sobre T_2
 - T_2 não é qualquer, está relacionado com T_1
 - O requerente pode apresentar T_2 assinado por X
 - Mas não pode alterar T_2
 - X não consegue associar T_2 ao T_1 que viu e assinou

Derivação de Chaves

- **Algoritmos requerem chaves de dimensão fixa**
 - 56, 128, 256... bits
- **Necessário derivar chaves de várias fontes**
 - Segredos partilhados
 - Passwords geradas por humanos
 - Códigos PINs e segredos pequenos..
- **Fonte original pode ter baixa entropia**
 - Reduz dificuldade de um ataque de força bruta
 - Necessário existir uma transformação complexa entre fonte e chave
- **Necessário poder-se chegar a múltiplas chaves para a mesma password**
 - Evitar deduzir a password a partir da chave gerada

Derivação de Chaves

- **Reforço das chaves: Aumento da segurança de uma password**
 - Tipicamente definida por humanos
 - Tornar os ataques por dicionário impraticáveis
- **Expansão das chaves: Aumento da dimensão de uma password**
 - Expansão até ao pretendido para o algoritmo
 - Eventualmente também a geração de outros valores como chaves para MACs

Derivação de Chaves

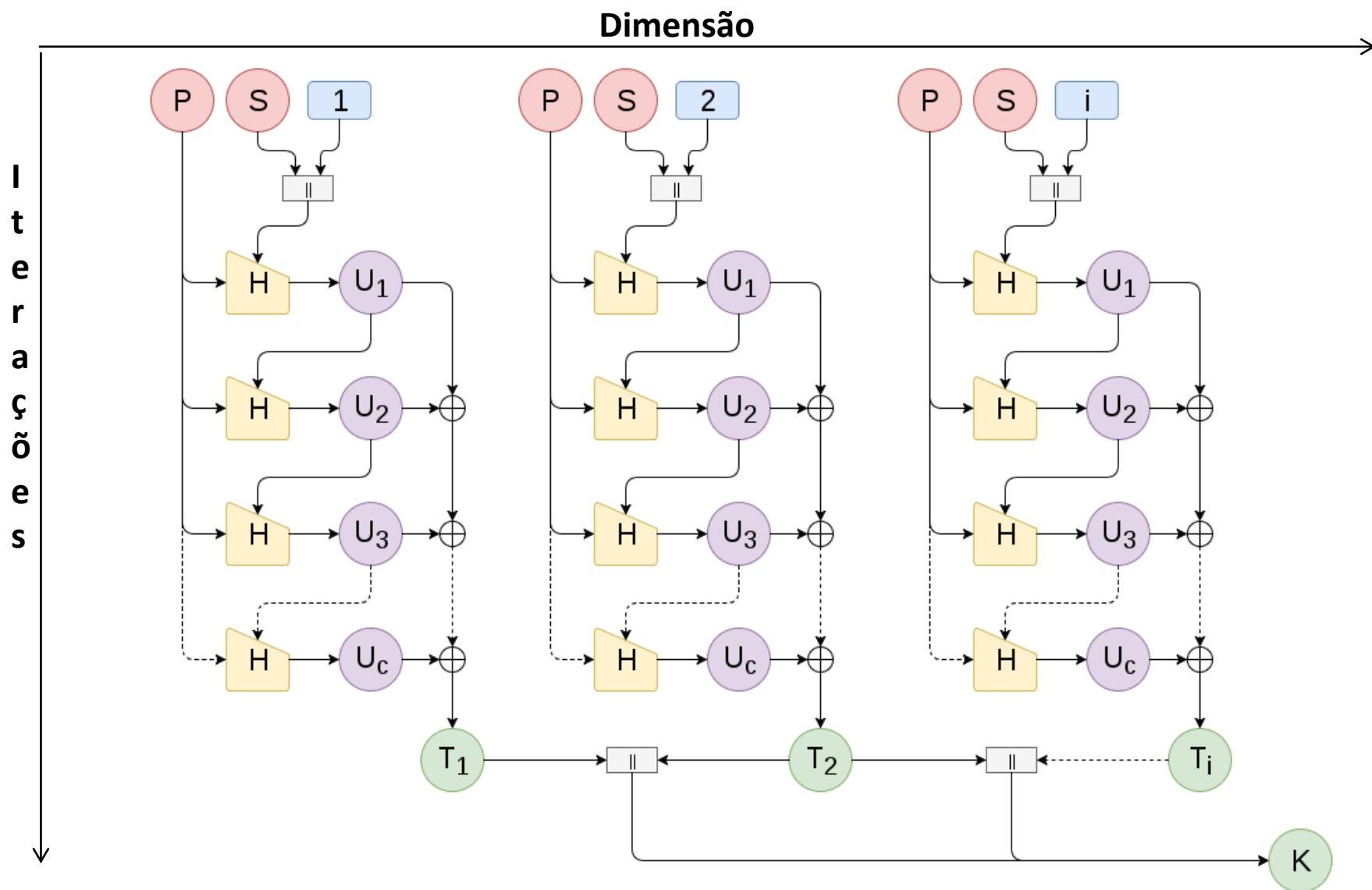
- **Derivação de chaves impõe a existência de:**
 - um Sal que torna a geração única
 - um problema custoso
 - um grau de complexidade parametrizável
- **Dificuldades computacionais:** Transformação requer recursos computacionais relevantes para ser realizada
- **Dificuldades de armazenamento:** Transformação ocupa recursos de armazenamento relevantes (memória)

Derivação de Chaves: PBKDF2

Password Based Key Derivation Function 2

- **Produz uma chave com um custo computacional pré-definido**
- **$K = \text{PBKDF2}(\text{PRF}, \text{Sal}, \text{Iterações}, \text{Password}, \text{dim})$**
 - PRF: Pseudo-Random-Function: Uma síntese
 - Sal: Um valor aleatório
 - Iterações: O custo (um valor nas centenas de milhares)
 - Password: Um segredo
 - Dim: a dimensão do resultado pretendido
- **Operação: Realiza $N \times \text{dim}$ operações do PRF, com base no SAL e password**
 - Quanto maior o valor de N , maior o custo

Derivação de Chaves: PBKDF2



Derivação de Chaves: scrypt

- Produz uma chave com um custo de armazenamento pré-definido
- **$K = \text{scrypt}(\text{Password}, \text{Sal}, N, p, \text{dim}, r, \text{hLen}, \text{MFlen})$**
 - Password: um segredo a expandir
 - Sal: Um valor aleatório
 - N: parâmetro de custo
 - p: Parâmetro de paralelização. $p \leq (2^{32} - 1) * \text{hLen} / \text{MFlen}$
 - dim: a dimensão da chave a produzir
 - r: o tamanho dos blocos a usar (tipicamente 8)
 - hLen: dimensão da função de síntese (32 para SHA256)
 - MFlen: bytes na mistura interna (tipicamente $8 \times r$)

Derivação de Chaves: scrypt

