

**Hace 2 días...**

El operador módulo en lenguajes de programación...

$$n * (a / n) + a \% n = a$$

División entera

Si  $7 / -15 = -1$  entonces  $7 \% -15 = -8$

Si  $7 / -15 = 0$  entonces  $7 \% -15 = 7$

Si nos mantenemos **siempre** en módulo  
-15 entonces todo funciona bien.

¿Si salimos de ese mundo?

$$56 \ / \ (7 \ \% \ -15) \ + \ 8 \ = \ \begin{matrix} 1 \\ 16 \end{matrix}$$

Al menos  $1 \equiv 16 \pmod{-15}$

¿Si aplicamos otros módulos?

$$10 \ \% \ (7 \ \% \ -15) \ = \ \begin{matrix} -6 \\ 3 \end{matrix}$$

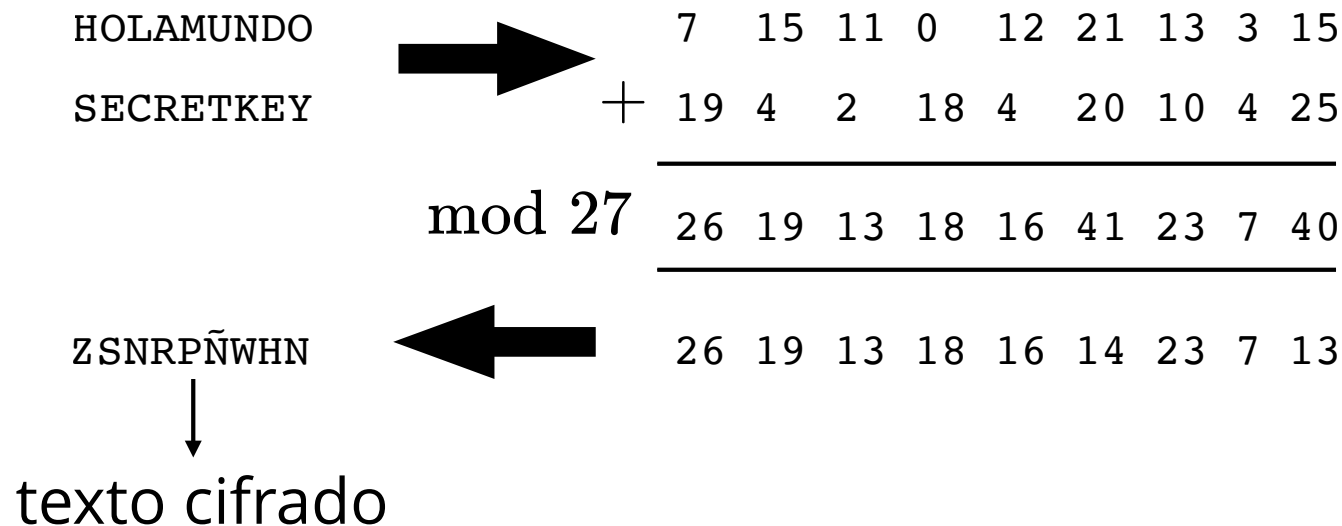
Aquí tenemos:

$$3 \not\equiv -6 \pmod{-15} \quad 3 \not\equiv -6 \pmod{7} \quad 3 \not\equiv -6 \pmod{-8}$$

# ONE-TIME PAD (OTP)

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
0	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

Para enviar un mensaje de largo  $\ell$   
necesitaremos una llave de largo  $\ell$



## ¿Cómo decriptar?

$$\begin{array}{rcl}
 \text{ZSNRPÑWHN} & \xrightarrow{\quad} & \begin{array}{cccccccccc} 26 & 19 & 13 & 18 & 16 & 14 & 23 & 7 & 13 \end{array} \\
 \text{SECRETKEY} & & \begin{array}{r} - \\ 19 \ 4 \ 2 \ 18 \ 4 \ 20 \ 10 \ 4 \ 25 \\ \hline \end{array} \\
 & & \begin{array}{r} \text{mod } 27 \\ 7 \ 15 \ 11 \ 0 \ 12 \ -6 \ 13 \ 3 \ -12 \\ \hline \end{array} \\
 \text{HOLAMUNDO} & \xleftarrow{\quad} & \begin{array}{cccccccccc} 7 & 15 & 11 & 0 & 12 & 21 & 13 & 3 & 15 \end{array}
 \end{array}$$

Para formalizarlo necesitamos convertir mensajes, llaves y textos cifrados en arreglos de enteros

$$m = \text{HOLAMUNDO}$$

$$\bar{m} = (7, 15, 11, 0, 12, 21, 13, 3, 15)$$

$$k = \text{SECRETKEY}$$

$$\bar{k} = (19, 4, 2, 18, 4, 20, 10, 4, 25)$$

$$c = \text{ZSNRPÑWHN}$$

$$\bar{c} = (26, 19, 13, 18, 16, 14, 23, 7, 13)$$

De la misma forma necesitamos hacer  
la conversión en la otra dirección

$$a = (4, 9, 4, 12, 16, 11, 15) \quad \bar{a} = \text{EJEMPLO}$$

Naturalmente, siempre se cumple que  $\overline{\bar{s}} = s$

Con esto definimos OTP en base a

$$Enc(k, m) = \overline{(\bar{m} + \bar{k}) \bmod 27}$$

$$Dec(k, c) = \overline{(\bar{c} - \bar{k}) \bmod 27}$$

Desde ahora supondremos que nuestros mensajes y llaves **son** arreglos de números

Definiremos OTP simplemente usando

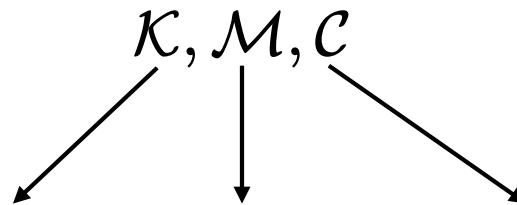
$$Enc(k, m) = (m + k) \bmod 27$$

$$Dec(k, c) = (c - k) \bmod 27$$

$$Dec(k, Enc(k, m)) = ((m + k) \bmod 27 - k) \bmod 27$$

$$= (m + k - k) \bmod 27 = m \bmod 27 = m$$

# Esquema criptográfico



Espacio de llaves, mensajes y textos cifrados

Un esquema es un triple  $(Gen, Enc, Dec)$

$Gen$  es una distribución de probabilidades sobre  $\mathcal{K}$

Es decir,  $Gen : \mathcal{K} \rightarrow [0, 1]$  tal que  $\sum_{k \in \mathcal{K}} Gen(k) = 1$

$Enc : \mathcal{K} \times \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{C}$  es el algoritmo para encriptar

$Dec : \mathcal{K} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{M}$  es el algoritmo para decriptar



Esperamos que para un esquema criptográfico  $(Gen, Enc, Dec)$  se cumpla

$$\forall k \in \mathcal{K} \forall m \in \mathcal{M} : Dec(k, Enc(k, m)) = m$$

En este caso diremos que el esquema es *perfectamente correcto*

¿Por qué *perfectamente*?

OTP: sobre  $\{0, 1, \dots, N\}$  y mensajes de largo  $\ell$  ( $\text{OTP}^{N,\ell}$ )

$$\mathcal{K} = \mathcal{M} = \mathcal{C} = \{0, \dots, N - 1\}^\ell$$

*Gen* es la distribución uniforme sobre  $\{0, \dots, N - 1\}^\ell$

$$\text{Enc}(k, m) = (m + k) \bmod N$$

$$\text{Dec}(k, c) = (c - k) \bmod N$$

# ¿Qué tan bueno es OTP?

¿Qué pasa si veo un mensaje cifrado  $c$  pasar?

Aquí un ejemplo:

```
c = "YFTGXEIWIWEHAGQGESLPNEFBGIYTBMLMQZVTYHIUKWSHYR"  
m = "ESTEMENSAJEESLITERALMENTEIMPOSIBLEDEDESCRIPTAR"  
k = "UNACLAVEINADIVINABLEYNISIQUIERAPORFUERZABRUTA"
```

# Perfect Secrecy

¿Cuándo decimos que un esquema  
criptográfico es *perfectamente secreto*?

Pensemos en la idea de que si un atacante  
ve un texto cifrado *no gana información*.

Podríamos decir algo como lo siguiente:

*"Al ver un texto cifrado  $c$  pasar, para el atacante el mensaje original  $m$  podría haber sido cualquiera"*

¿Cómo formalizamos esto?

Dado un texto cifrado  $c_0$  se cumple que

$$\forall m_0 \in \mathcal{M} : \Pr_{k \sim \text{Gen}} [\text{Enc}(k, m_0) = c_0] = \frac{1}{|\mathcal{M}|}$$

$$\forall m_0 \in \mathcal{M} : \Pr_{k \sim \text{Gen}} [\text{Enc}(k, m_0) = c_0] = \frac{1}{|\mathcal{M}|}$$

¿Cómo se calcula esta probabilidad?

Es simplemente la probabilidad de haber elegido una llave que encripte  $m_0$  como  $c_0$

$$\sum_{k \in \mathcal{K} | \text{Enc}(k, m_0) = c_0} \text{Gen}(k)$$

¿Qué pasa si el atacante tenía información previa sobre el mensaje?

Por ejemplo sabe que el mensaje puede ser "*atacar ahora*" o "*emprender retirada*"

Podría incluso estimar que atacarán con probabilidad  $1/3$

¿Cómo modelamos esto matemáticamente?

Supondremos que el atacante tiene una distribución de probabilidad  $\mathbb{D}$  sobre  $\mathcal{M}$



Para cada distribución de probabilidad  $\mathbb{D}$  sobre  $\mathcal{M}$  y cada texto cifrado  $c_0 \in \mathcal{C}$  se cumple que

$$\forall m_0 \in \mathcal{M} : \Pr_{\substack{m \sim \mathbb{D} \\ k \sim \text{Gen}}} [m = m_0 \mid \text{Enc}(k, m) = c_0] = \Pr_{m \sim \mathbb{D}} [m = m_0]$$

$$\text{Recordemos que } \Pr(A|B) = \frac{\Pr(A \cap B)}{\Pr(B)}$$

$$\frac{\mathbb{D}(m_0) \sum_{k \in \mathcal{K} \mid \text{Enc}(k, m_0) = c_0} \text{Gen}(k)}{\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K} \mid \text{Enc}(k, m) = c_0} \mathbb{D}(m) \text{Gen}(k)} \stackrel{?}{=} \mathbb{D}(m_0)$$

¿Es  $\text{OTP}^{N,\ell}$  perfectamente secreto?

1.  $\text{Gen}$  es la distribución uniforme  $1/N^\ell$
2. Para cada  $c_0$  y cada  $m_0$  existe una única llave  $k$  tal que  $\text{Enc}(k, m_0) = c_0$

Sea  $c_0 \in \mathcal{C}$  un texto cifrado y  $m_0$  un mensaje.

$$\frac{\mathbb{D}(m_0) \sum_{k \in \mathcal{K} | \text{Enc}(k, m_0) = c_0} \text{Gen}(k)}{\sum_{m \in \mathcal{M}} \mathbb{D}(m) \sum_{k \in \mathcal{K} | \text{Enc}(k, m) = c_0} \text{Gen}(k)}$$

$$1 \leftarrow \frac{\mathbb{D}(m_0) \cdot \cancel{1/N^\ell}}{\sum_{m \in \mathcal{M}} \mathbb{D}(m) \cdot \cancel{1/N^\ell}} = \mathbb{D}(m_0)$$

# ¿Definiciones alternativas?

1. Dados dos mensajes y un texto cifrado, la probabilidad de que el texto cifrado haya sido generado por un mensaje o por el otro es la misma.
2. La probabilidad de ver cualquier texto cifrado sin conocimiento previo es la misma que la probabilidad de ver dicho texto cifrado conociendo el mensaje de antemano.
3. La distribución de probabilidad sobre los mensajes es independiente de la distribución de probabilidad sobre los textos cifrados.

Ejercicio: formalizar estas nociones

4 clases y ya tenemos un esquema perfecto...



# Lamentablemente...

Hemos discutido en clases que pareciera *moles to y/o poco razonable* que la llave tenga que ser tan larga como el mensaje.

¿Cómo modificamos OTP para tener  $|\mathcal{K}| < |\mathcal{M}|$  y seguir teniendo un esquema criptográfico *perfectamente secreto*?

No podemos 🤔

# Teorema

Sean  $\mathcal{M}, \mathcal{K}, \mathcal{C}$  espacios de mensajes, llaves y textos cifrados, respectivamente.

Si  $|\mathcal{K}| < |\mathcal{M}|$ , entonces no existe un esquema  $(Gen, Enc, Dec)$  que sea perfectamente secreto.

Así de simple.

# Demostración

Supongamos que  $|\mathcal{K}| < |\mathcal{M}| \leq |\mathcal{C}|$  y sea  $(Gen, Enc, Dec)$  un esquema criptográfico

Sea  $\mathbb{D}$  una distribución sobre  $\mathcal{M}$  y  $m_0 \in \mathcal{M}$  un mensaje tal que  $\mathbb{D}(m_0) > 0$

Como  $|\mathcal{K}| < |\mathcal{M}| \leq |\mathcal{C}|$ , debe existir  $c_0 \in \mathcal{C}$  para el cual **ninguna** llave  $k \in \mathcal{K}$  satisface  $Enc(k, m_0) = c_0$

$$\Pr_{\substack{m \sim \mathbb{D} \\ k \sim Gen}}[m = m_0 \mid Enc(k, m) = c_0] < \mathbb{D}(m_0) = \Pr_{m \sim \mathbb{D}}[m = m_0]$$

0

Adiós perfect secrecy...





# Back to reality

OTP y la noción de Perfect Secrecy son fundamentales para entender lo que viene

Pero en la práctica vamos a buscar otras propiedades...

¿Bajo qué modelo de ataque es OTP seguro?

1. Texto cifrado (sólo veo  $c_0, c_1, \dots$ )
  2. Texto cifrado (veo  $(m_0, c_0), (m_1, c_1), \dots$ )
  3. Texto plano elegido (mando a encriptar  $m$ 's)
  4. Texto cifrado elegido (mando a encriptar  $m$ 's y a desencriptar  $c$ 's)
- 