ISEL
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Esquemas Simétricos

- Esquemas de confidencialidade e autentidade
- Primitivas de cifra simétrica e modos de operação

ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1 | 1959-007 Lisboa

Sumário

- Hierarquia de mecanismos criptográficos
- Esquemas criptográficos
  - Esquemas simétricos de cifra
  - Esquemas MAC
- Primitivas de cifra e modos de operação

Proteção criptográfica de dados

Situação	Ameaça	Ação
Dados em repouso: - no dispositivo do utilizador - na rede interna - na *cloud*	Processo malicioso ou não autorizado pode ler ou modificar dados	Cifra e autenticação de ficheiros/discos e comunicações
Dados estão a ser transferidos entre computadores (ex: *browser* <-> servidor)	Um atacante com acesso à rede pode ler ou modificar os dados	

Mecanismos criptográficos

- Primitivas – operações matemáticas, usadas como blocos construtores na realização de esquemas; a sua caracterização depende dos problemas matemáticos que sustentam a sua utilização criptográfica
  - ex: DES, RSA
- Esquemas – combinação de primitivas e métodos adicionais para a realização de tarefas criptográficas como a cifra e a assinatura digital
  - ex: DES-CBC-PKCS5Padding; RSA-OAEP-MGF1-SHA1
- Protocolos – sequências de operações, a realizar por duas ou mais entidades, envolvendo esquemas e primitivas, com o propósito de dotar uma aplicação com características seguras
  - ex: TLS com TLS_RSA_WITH_DES_CBC_SHA

Introdução à criptografia computacional

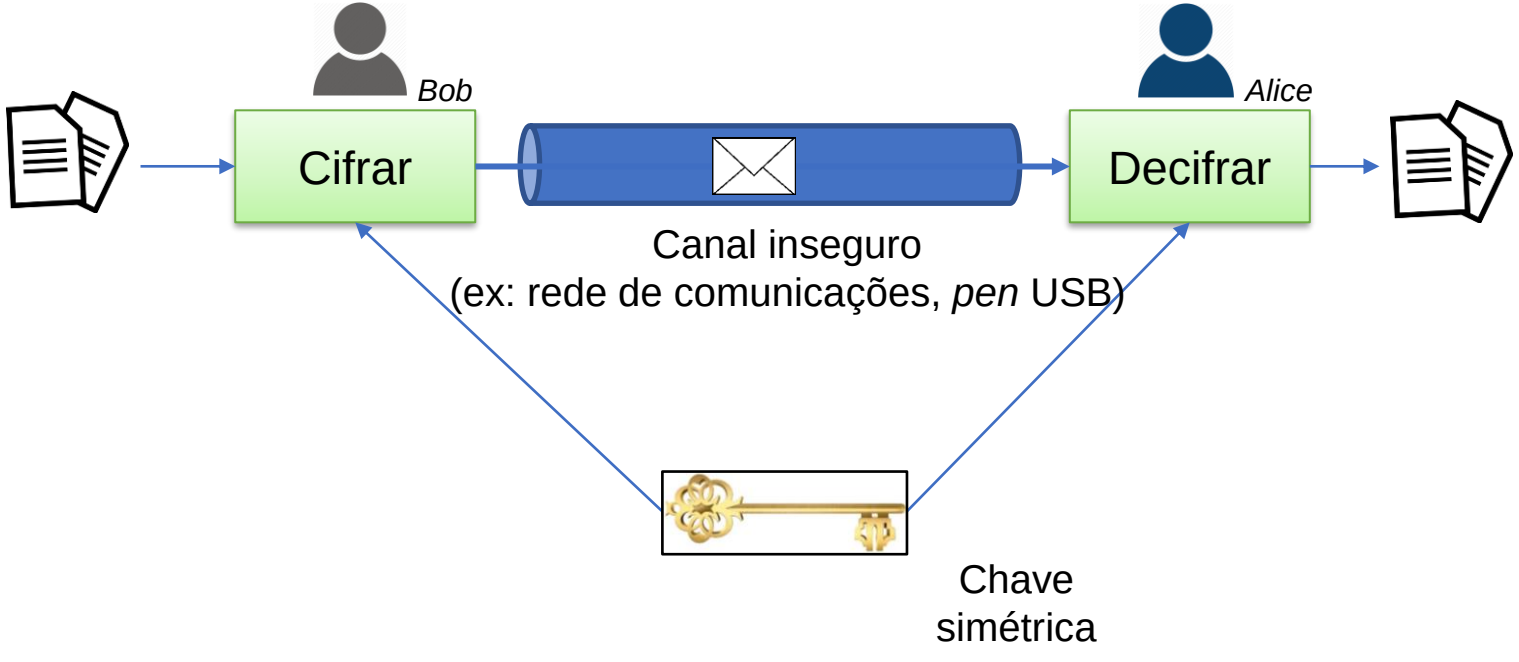
- Esquemas simétricos
  - Cifra e autenticidade
- Esquemas assimétricos
  - Cifra e assinatura digital

	Simétrico	**Assimétrico**
Confidencialidade	Cifra simétrica	Cifra assimétrica
Autenticidade	MAC	Assinatura Digital

Características gerais da criptografia simétrica

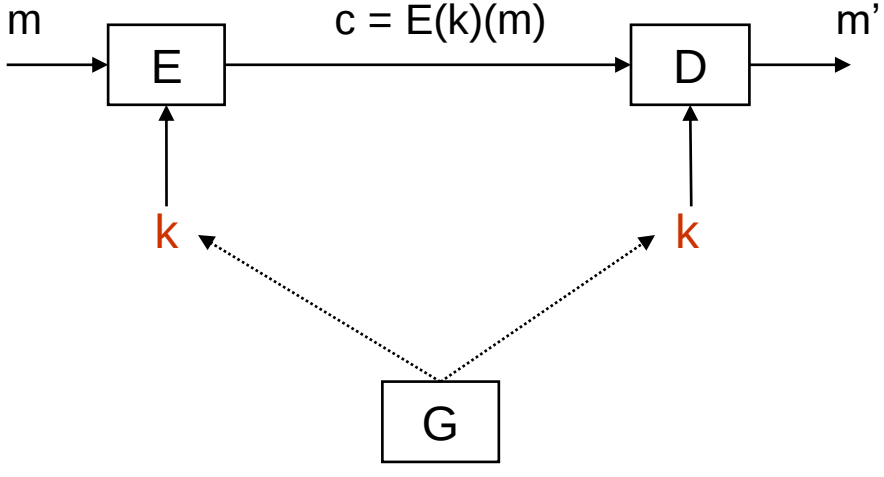
- Processo de *proteção* e *desproteção* usando a mesma chave
- Chaves são normalmente usadas durante pouco tempo
- Chaves estabelecidas após um processo de negociação entre quem cifra e quem decifra

Cifra simétrica



Esquema de cifra simétrica

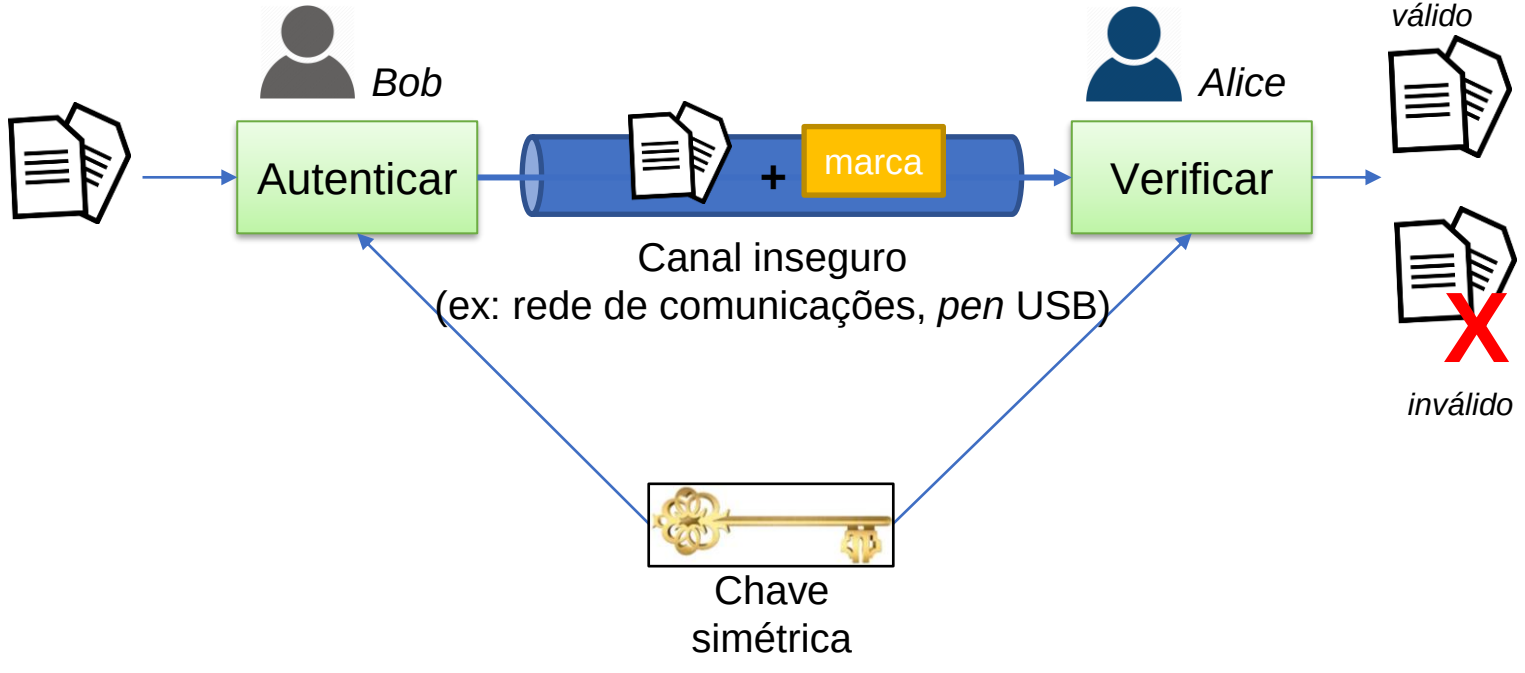
- Esquema de cifra simétrica – algoritmos **(G,E,D)**
  - **G** – função (probabilística) de geração de chaves
    G: $\rightarrow$ **Keys**
  - **E** – função (probabilística) de cifra
    E: **Keys** $\rightarrow$ {0,1}* $\rightarrow$ {0,1}*
  - **D** – função (determinística) de decifra
    D: **Keys** $\rightarrow$ {0,1}* $\rightarrow$ {0,1}*



Propriedades da cifra simétrica

- Propriedade da correcção
  - $\forall$ m $\in$ {0,1}*, $\forall$ k $\in$ **Keys**: D(k)(E(k)(m)) = m
    - **Keys** é o conjunto de chaves geradas por G
- Propriedades de segurança
  - É *computacionalmente infazível* obter **m** a partir de **c**, sem o conhecimento de **k**
- Esquema simétrico
  - utilização da mesma chave **k** nas funções E e D
- Mensagem **m** e *criptograma* **c** são sequências de *bytes* com dimensão variável (**{0,1}***)
- Não garante integridade
- Exemplos:
  - DES-CBC-PKCS5Padding

Autenticação de mensagens



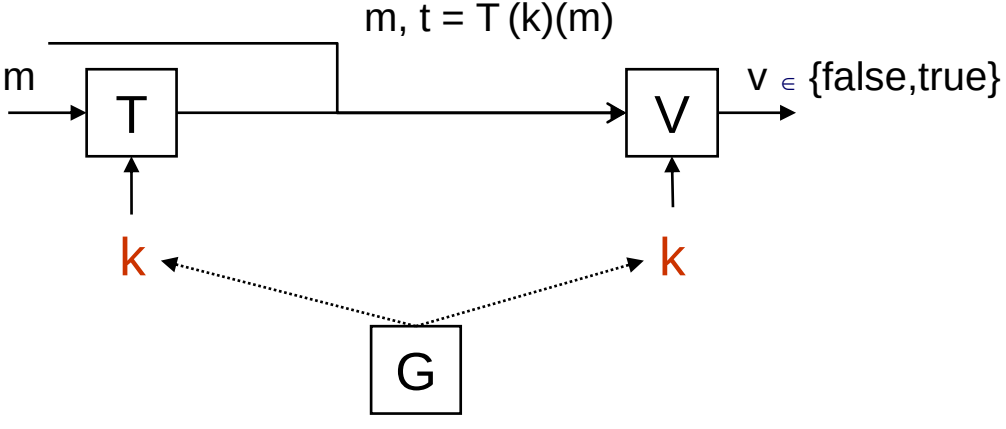
Esquema MAC

- Esquema MAC (*Message Authentication Codes*) – algoritmos **(G,T,V)**
  - **G** – função (probabilística) de geração de chaves

    G: $\rightarrow$ **Keys**
  - **T** – função (probabilística) de geração de marcas

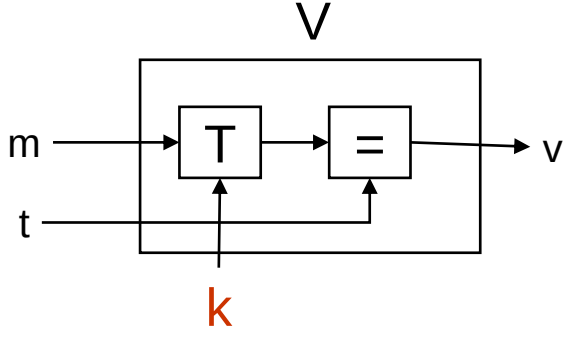
    T: **Keys** $\rightarrow \{0,1\}^* \rightarrow$ **Tags**
  - **V** – função (determinística) de verificação de marcas

    V: **Keys** $\rightarrow$ (**Tags** $\times \{0,1\}^*$) $\rightarrow$ {true, false}



Esquema MAC (2)

- Esquema usual para o algoritmo de verificação
  - Algoritmo **T** é determinístico
  - Algoritmo **V** usa **T**
  - **V(k)(t, m)**: **T(k)(m) = t**



Propriedades do MAC

- Propriedade da correcção
  - $\forall$ **m** $\in \{0,1\}^*$, $\forall$ **k** $\in$ **Keys**: **V(k)(T(k)(m),m) = true**
- Propriedades de segurança
  - Sem o conhecimento de **k**, é *computacionalmente infazível*
    - falsificação selectiva – dado **m**, encontrar **t** tal que **V(k)(t, m) = true**
    - falsificação existencial – encontrar o par **(m, t)** tal que **V(k)(t,m) = true**
- Esquema simétrico
  - utilização da mesma chave **k** nos algoritmos **T** e **V**
- Mensagem **m** é uma sequência de *bytes* de dimensão variável
- Marca **t** (*tag*) tem tipicamente dimensão fixa
  - Por exemplo: 160, 256, 512 *bits*
- Códigos detectores e correctores de erros não servem para esquemas de MAC
- Exemplos: HMAC-SHA1

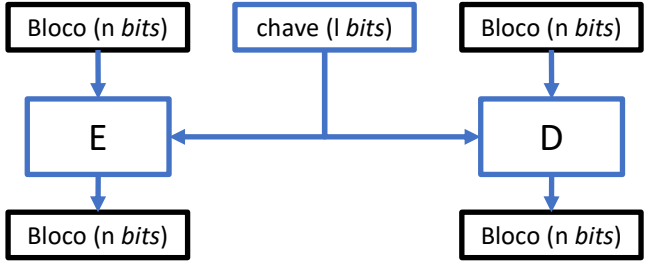
Primitivas de cifra simétrica

- Para usar um esquema de cifra simétrica é preciso escolher uma primitiva de cifra
  - AES, DES, Blowfish, …
- Algumas primitivas estão especificadas em *standards* internacionais ou em publicações académicas
  - https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.197.pdf (AES)
  - https://csrc.nist.gov/csrc/media/publications/fips/46/3/archive/1999-10-25/documents/fips46-3.pdf (DES, *deprecated*)
  - https://www.schneier.com/academic/archives/1994/09/description_of_a_new.html
- Existem várias implementações disponíveis
- Boas práticas:
  - Usar algoritmos seguros públicos
  - Usar implementações de *confiança*

Primitivas de cifra simétrica

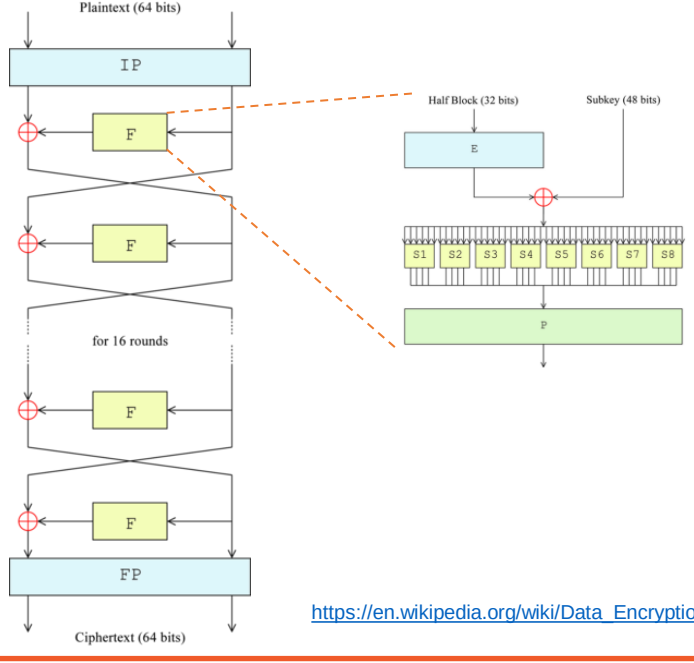
- Primitiva de cifra em bloco
  - Função **E: $\{0,1\}^l \rightarrow \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^n$**
    tal que $\forall$ **k** $\in$ **$\{0,1\}^l$** a função **E(k)** é uma permutação
  - Designa-se por **D: $\{0,1\}^l \rightarrow \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^n$** a função que verifica
    $\forall$ **k** $\in$ **$\{0,1\}^l$** e $\forall$ **m** $\in$ **$\{0,1\}^n$: D(k)(E(k)(m)) = m**

- A dimensão do bloco é **n** (ex. 64 *bit*, 128 *bit*)
- A dimensão da chaves é **l** (ex. 56 *bit*, 128 *bit*, 256 *bit*)



Características gerais das primitivas simétricas

- A dimensão **n** do bloco deve ser suficientemente elevada para impossibilitar ataques baseados na estatística do texto em claro
- A dimensão da chave **l** deve ser suficientemente elevada para impossibilitar ataques de pesquisa exaustiva
- Elementos construtores
  - Substituições
  - Transposições



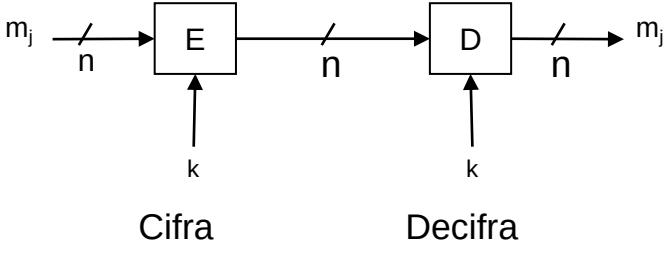
https://en.wikipedia.org/wiki/Data_Encryption_Standard

Modos de operação

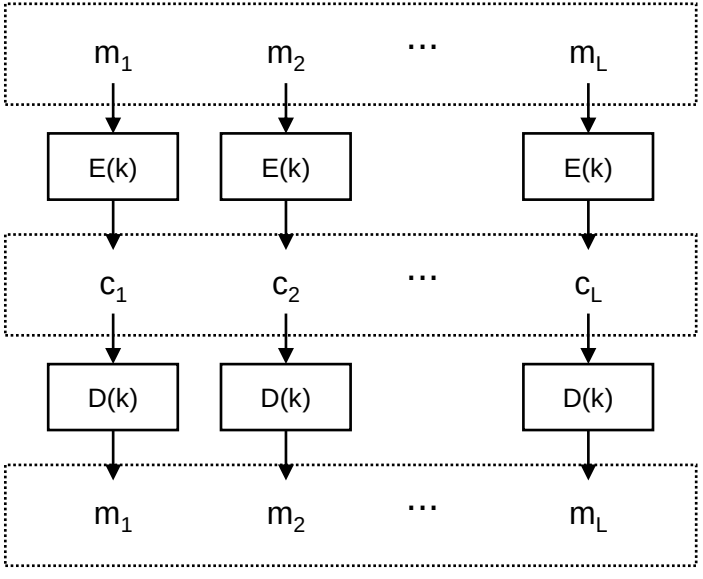
- Problema: Como efectuar a cifra de mensagens com dimensão superior à de um bloco?

- Considerações:
  - Padrões no texto em claro não deverão ser evidentes no texto cifrado
  - A eficiência do método usado não deverá ser muito inferior à eficiência da primitiva de cifra em bloco usada
  - A dimensão do texto cifrado deve ser aproximadamente igual à dimensão do texto em claro
  - Em algumas aplicações é importante que a decifra seja capaz de recuperar de erros, adições e remoções de *bits* ocorridos no texto cifrado
  - Acesso aleatório – capacidade de decifrar e alterar apenas parte do criptograma

Modo Electronic-Codebook (ECB)



- A primtiva garante que os padões do **bloco** em claro não passam para os **bloco** cifrado
- E se o bloco se repetir na mensagem?



Modo *electronic-codebook* (ECB)

- Blocos de texto em claro iguais:
  - Blocos de texto em claro iguais, cifrados com a mesma chave, implicam blocos de texto cifrado iguais
- Interdependência na cifra:
  - A cifra é realizada de forma independente de bloco para bloco
- Propagação de erros:
  - A ocorrência de erros num bloco de texto cifrado afecta apenas a decifra desse bloco
- Acesso aleatório:
  - Permite acesso aleatório para decifra e “recifra” de múltiplos de blocos.

Efeito dos modos de operação

Imagem original

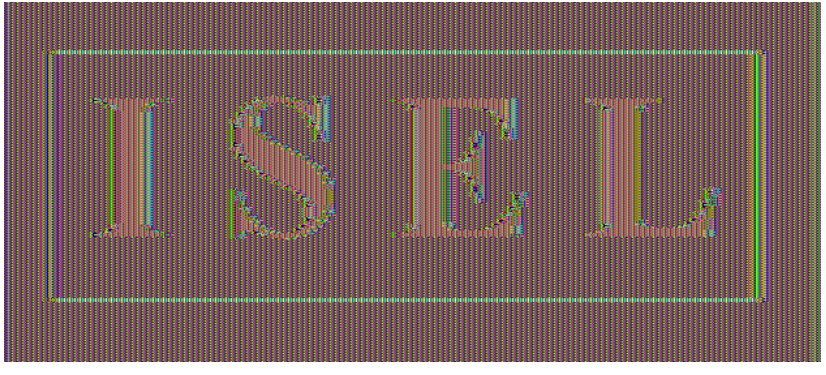


Imagem cifrada com **DES** em modo **ECB**

Efeito dos modos de operação

Imagem original

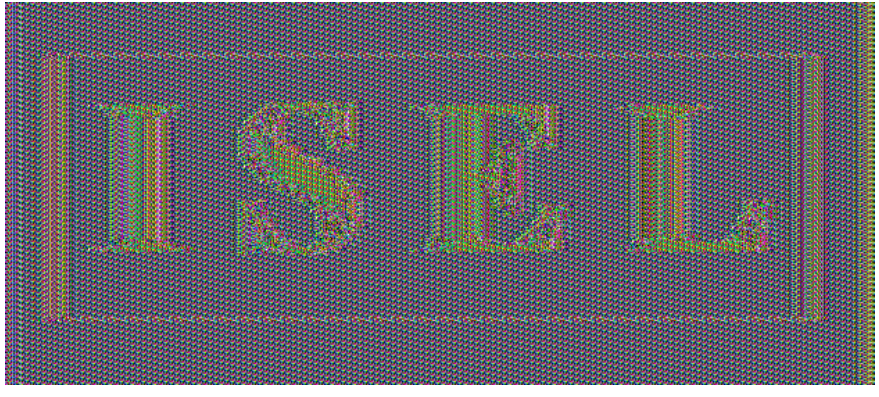


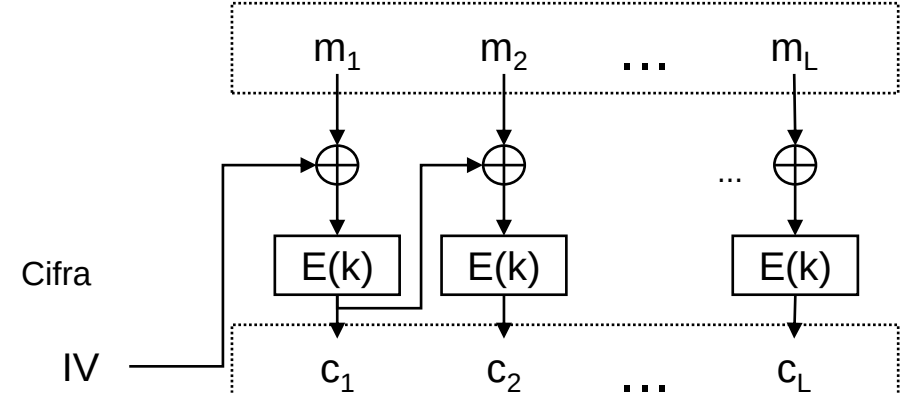
Imagem cifrada com **AES** em modo **ECB**

Efeito dos modos de operação

Imagem original

DES+CBC ou AES+CBC

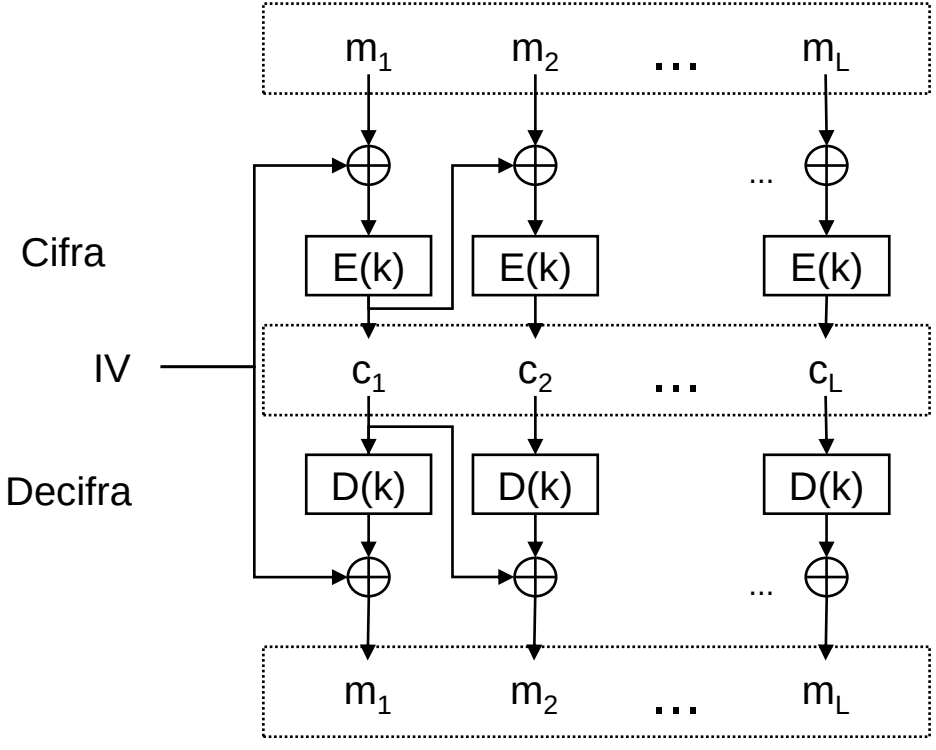
Modo *cipher block chaining* (CBC)



Decifra

?

Modo *cipher block chaining* (CBC)



Modo *cipher block chaining* (CBC)

- Blocos de texto em claro iguais:
  - Sob a mesma chave e sob o mesmo vector de iniciação, duas mensagens iguais implicam criptogramas iguais

- Interdependência na cifra:
  - A cifra de um bloco de texto em claro afecta a cifra dos blocos seguintes

- Propagação e recuperação de erros:
  - A ocorrência de erros num bloco $\mathbf{c}_j$ de texto cifrado afecta a decifra do próprio bloco e a do bloco seguinte $\mathbf{c}_{j+1}$. A decifra do bloco $\mathbf{c}_{j+1}$ terá erros nas mesmas posições que $\mathbf{c}_j$

- Observações:
  - A reordenação dos blocos de texto cifrado afecta a decifra
  - É relativamente fácil manipular um determinado bloco de texto em claro

Boas práticas sobre o IV

- Deve ser armazenado/transmitido em claro
- Não se deve repetir (*uniqueness*)
- Não deve ser previsível

Padding

- Seja X o número de bytes a acrescentar para que a dimensão da mensagem seja múltipla da dimensão do bloco
- Ex: PKCS# 5 (CBC-PAD):
  - Acrescentar X *bytes* com o valor X
  - Utilizações PKCS# 7, CMS, SSL

- A segurança do esquema depende da forma de *padding*?
- Ataque proposto por *S. Vaudenay*: *chosen ciphertext attack* utilizando o destinatário como *oráculo* que recebe criptogramas e retorna 1 ou 0 conforme o *padding* esteja correcto ou não
  - https://www.iacr.org/cryptodb/archive/2002/EUROCRYPT/2850/2850.pdf

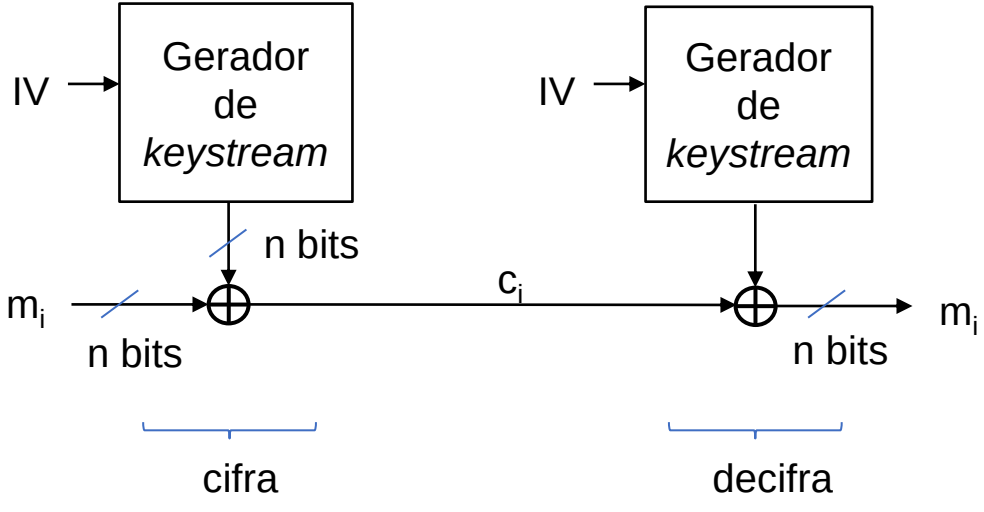
Demonstração com OpenSSL

Cifra e MAC

Modos de operação em *stream*

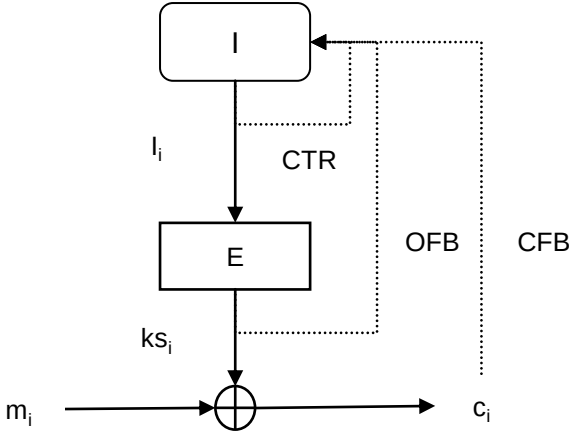
- Modos como o CBC precisam de algoritmos diferentes para cifra e decifra

- Modo de operação em *stream*

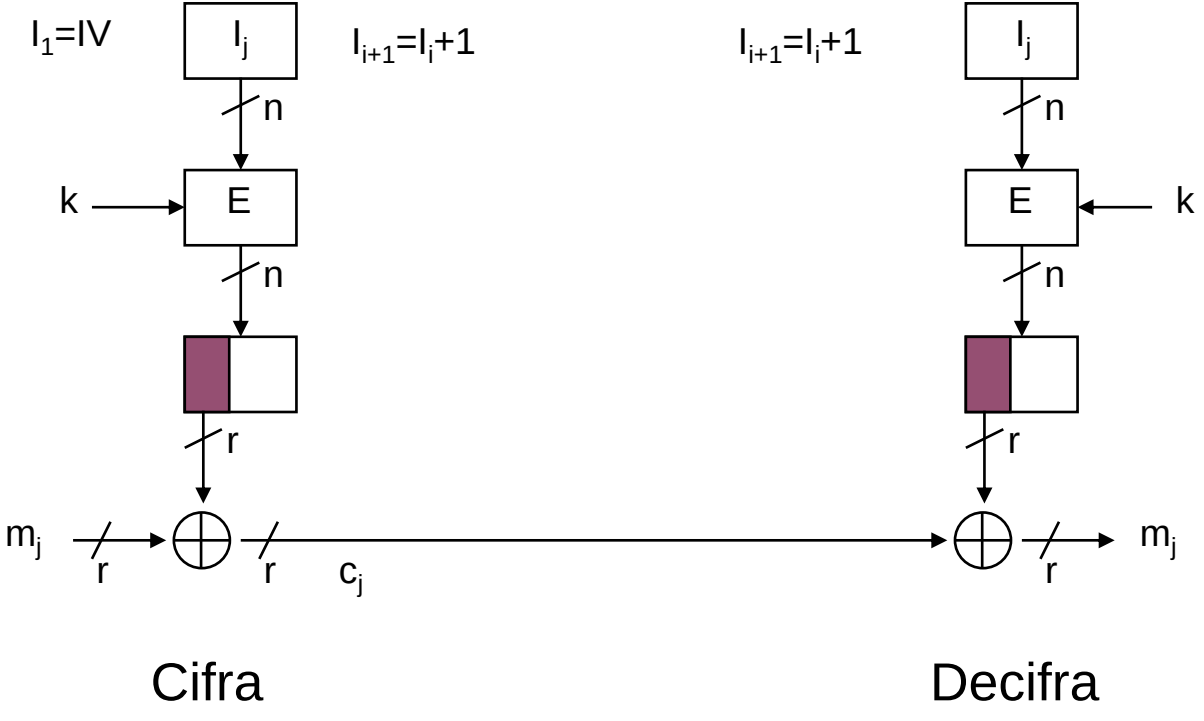


Modos de operação em *stream*

- Modo *Stream*
  - Estado **I**
  - *Key stream* **ks**
  - $\mathbf{ks_i = E(k)(I_i)}$
  - $\mathbf{c_i = m_i \oplus ks_i}$
- *Cipher FeedBack* (CFB)
  - $\mathbf{I_i = c_{i-1}}$
- *Output FeedBack* (OFB)
  - $\mathbf{I_i = ks_{i-1}}$
- *Counter* (CTR)
  - $\mathbf{I_i = f(I_{i-1})}$
- Problema:
  - se $\mathbf{ks_i = ks_j}$ então $\mathbf{m_i \oplus m_j = c_i \oplus c_j}$



Modo *Counter* (CTR)



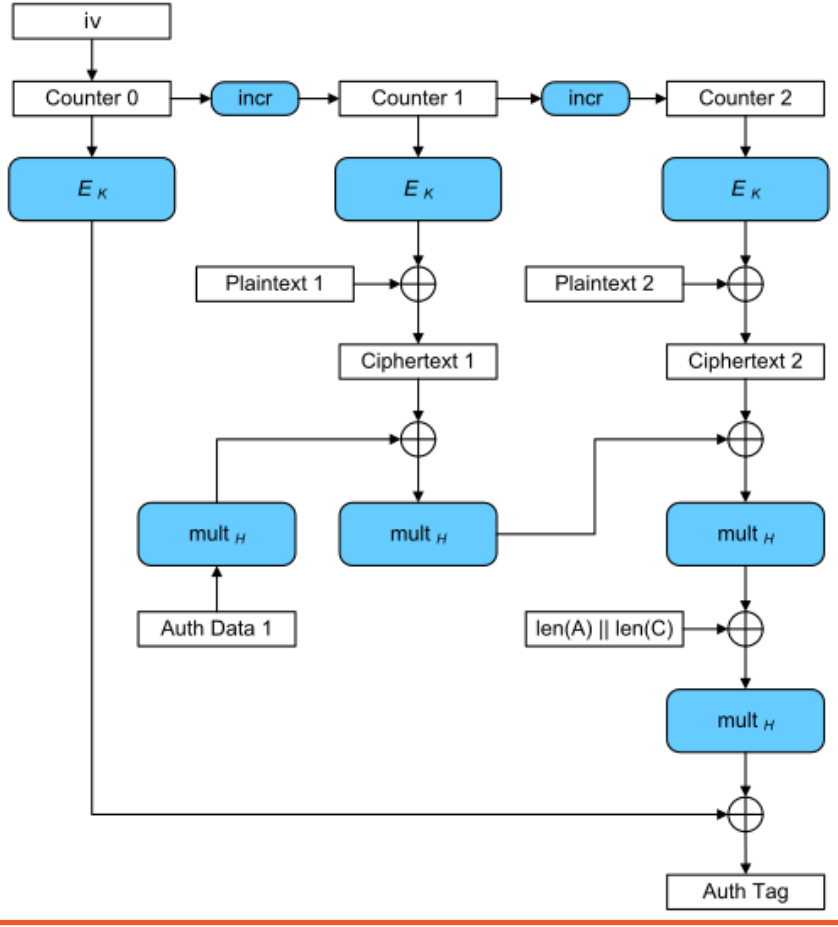
Modo *Counter* (CTR)

- Blocos de texto em claro iguais:
  - Sob a mesma chave e sob o mesmo vector de iniciação, duas mensagens iguais implicam criptogramas iguais
- Propagação e recuperação de erros:
  - A ocorrência de erros num bloco de texto cifrado $\mathbf{c}_j$ afecta apenas a decifra desse bloco. O bloco $\mathbf{m}_j$ resultante da decifra do bloco $\mathbf{c}_j$ terá erros nas mesmas posições que $\mathbf{c}_j$
- Acesso aleatório:
  - Permite acesso aleatório para decifra e "recifra" de *bits*
- Observações:
  - É relativamente fácil manipular um determinado bloco de texto em claro

Cifra autenticada

- Para garantir confidencialidade e simultaneamente autenticidade, tem de se usar uma combinação dos esquemas Cifra e MAC
- Existem duas abordagens
  - *Encrypt-then-MAC*
    - $E(k_1)(M) \,||\, T(k_2)(\, E(k_1)(M)\,)$
    - A marca indica se houve alteração ou não do criptograma
  - *MAC-then-encrypt*
    - $E(k_1)(\, M \,||\, T(k_2)(\, M\,)\,)$
    - A marca é gerada sobre a mensagem, e é posteriormente tudo cifrado
- Existem modos de operação cujo objectivo é produzirem uma *cifra autenticada*, combinando as operações num só algoritmo
  - Galois Counter Mode (GCM)
  - Offset codebook mode (OCB)
  - Counter with CBC-MAC (CCM)

Cifra autenticada - Exemplo



Galois Counter Mode

Adaptado de
https://en.wikipedia.org/wiki/Galois/Counter_Mode