Criptografia

Dulce Domingos

acetatos basedos nos livros da bibliografia da disciplina e nos acetatos da disciplina de segurança de anos lectivos anteriores (de P.Veríssimo, A.Bessani, M.Calha, H.Reiser)

1

Sumário

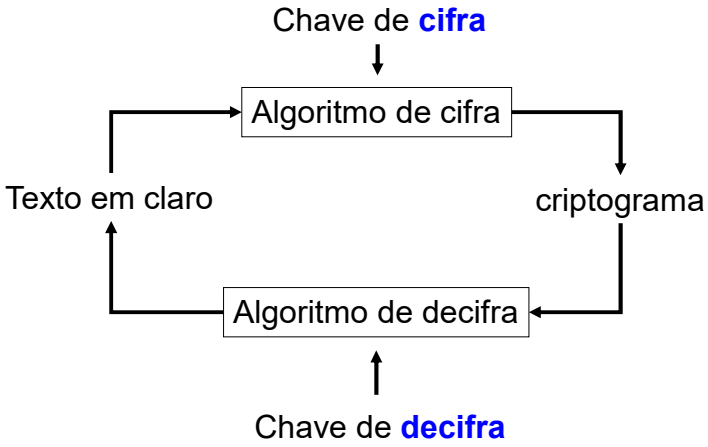
2

Introdução

- Criptografia
  - Krypthós (oculto) + graph (escrever)
  - ☹ o uso de criptografia revela-a
    - Fornece indícios de que a informação é sensível
    - Pode ser ilegal
- Esteganografia
  - Conteúdo sensível é ocultado dentro de outro conteúdo
  - Exemplos:
    - Escrita com tinta invisível
    - Ocultar conteúdos dentro de imagens nos bits menos significativos de cada pixel
- Criptanálise
  - Arte ou ciência de violar informação criptografada ou sistemas criptográficos
- Criptologia
  - Estudo de criptografia e criptanálise

3

Criptografia



4

Criptanálise

- Objectivos:
  - Obter texto original
  - Obter chave de cifra
  - Obter algoritmo de cifra

TPC

- Algumas técnicas
  - Ataques usando apenas o criptograma (ciphertext-only attacks)
  - Ataques com conhecimento de parte do texto original (known-plaintext attacks) + criptograma
  - Ataques com texto original escolhido (chosen-plaintext attacks)
    - Ataques com texto original escolhido de forma adaptativa (adaptive chosen-plaintext attacks)
  - Ataques com criptogramas escolhidos (chosen-ciphertext attacks)
  - Ataques de aniversário (birthday attacks)

5

Evolução da tecnologia de cifra

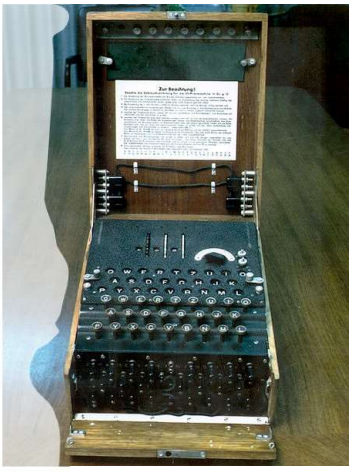
- Primeiras cifras
  - Espartanos
    - O pergaminho só poderia ser lido se fosse enrolado num bastão com o mesmo diâmetro

  - Cifra de César
    - Substitui uma letra pela $k^{ésima}$ letra seguinte no alfabeto, MOD 26
    - Mecanismo:
      - $E_k(m) = (m + k) \bmod 26\}$ (função de cifra)
      - $D_k(c) = (26 + c - k) \bmod 26\}$ (função para decifrar)
    - Exemplo:
      - $k = 2$
      - Texto em claro: seguranca
      - Texto cifrado: ugixtcpec

6

Evolução da tecnologia de cifra

- Cifras mecânicas
  - Máquinas usadas para cifrar e decifrar mensagens
  - Antes dos computadores modernos, eram muito usados
    - Na Segunda Guerra Mundial:
      - Enigma (Alemanha),
      - Hagelin (Aliados),
      - Purple (Japão)
  - Formas de concretização variam (ex. uso de vários cilindros), mas em geral baseavam-se no uso de várias cifras de substituição extremamente complexas



Sumário

- Introdução
- Criptografia e criptanálise
- Evolução da tecnologia de cifra
- **Tipos de cifra**
  - **Cifras de transposição**
  - **Cifras de substituição**
    - **Monoalfabéticas**
    - **Polialfabéticas**
- Conceitos teóricos
- Cifras modernas
  - Cifras simétricas
  - Modos de operação
    - Cifras por blocos
    - Cifras Contínuas
  - Cifras assimétricas
  - Cifras híbridas
  - Funções de síntese
  - Autenticação
    - MACs
    - Assinaturas digitais

Tipos de cifras: cifras de transposição

- **Baralham** os caracteres do texto original
- Exemplos:
  - Permutações fixas em blocos com um número constante de caracteres
    - Permutação 45231
    - Criptograma: raifc
    - Texto original ?
  - Blocos verticais de dimensão fixa
    - Blocos verticais de 5 caracteres:

      eaeo …
      loms
      esqo
      saun
      nbeh

Tipos de cifras: cifras de substituição

- **Substituem** os caracteres do alfabeto usado no texto original por caracteres de um alfabeto de substituição
- **Monoalfabéticas**
  - Usam apenas um alfabeto de substituição
  - Um carácter do alfabeto original é substituído sempre pelo mesmo carácter
  - Exemplo: cifra de César
  - Criptanálise
    - Força bruta
    - Ataques com texto original escolhido
    - Padrões estatísticos dos caracteres usados no texto original
  - **Polialfabéticas**
    - Aplicação sucessiva e cíclica de várias cifras monoalfabéticas
    - Cifra de Vigenère

Cifra Vigenère

- Chave: conjunto de caracteres
- Mecanismo:
  - Repete-se a chave em sequência até que a chave seja do tamanho do texto a ser cifrado
  - Para cada letra, é feita uma substituição:
    - B + C = D (A=0, B=1, C=2, ….)
  - Se a chave tem uma letra apenas, temos uma cifra monoalfabética
- Exemplo de uso:
  - *k* = poema

```
Chave              poemapoemapoe
Texto em claro     elesnaosabemq
Texto cifrado      tzienpcwmbtau
```

- Criptanálise:
  - Determinar a dimensão da chave -> criptanálise de N cifras monoalfabéticas
  - Técnicas estatísticas para determinar N: teste de Kasiski e índice de coincidência

11

Conceitos teóricos

- Cifra perfeita
  - Uma cifra diz-se **perfeita** quando, dado um criptograma *c*, a probabilidade de ele corresponder a um dado texto original *m* e de ter sido gerado com uma dada chave *k* é igual à probabilidade de ocorrência do texto *m*

Para cada texto em claro há sempre uma chave que geraria o criptograma

  - ⇒ O cardinal do espaço de chaves tem de ser igual ou superior ao cardinal do espaço de textos em claro
    - ⇒ Difícil
  - Cifra de Vernam
    - O comprimento da chave é maior ou igual do que o do texto a cifrar
  - Dificuldades
    - Para cada texto tem de ser usada uma chave diferente
    - O comprimento das chaves tem de ser igual ou superior ao dos textos
    - As chaves não são memorizáveis
    - Pré-distribuição de chaves de grande dimensão
    - Não faz sentido usar para cifrar dados armazenados

12

Conceitos teóricos

- Cifras seguras **na prática**
  - Uma cifra diz-se segura se cumprir o objectivo para que é usada
    - As **vulnerabilidades** da cifra, mesmo quando usada de forma correcta, não permitem a sua criptanálise em **tempo útil** e admitindo um **investimento** tendo em conta a relação **custo-benefício**
    - A cifra é usada de forma correcta, sem aumentar as suas vulnerabilidades intrínsecas

- Critérios para avaliar a qualidade das cifras [Claude Shannon,1949]:
  1. Quantidade de secretismo oferecida
     - Tempo mínimo de segurança do criptograma
     - Confusão e difusão (ver acetato seguinte)
  2. Dimensão das chaves
     - Cifra de Vernam – gestão de chaves ☹
  3. Simplicidade de realização e uso
  4. Propagação de erros
  5. Dimensão do criptograma
     - O tamanho do texto cifrado não deve ser maior que o do texto em claro – custo de armazenamento ou transmissão

13

Conceitos teóricos

- Cifras com boa quantidade de secretismo [Claude Shannon,1949]:
  - Confusão
    - Relação entre texto em claro, chave e criptograma deve ser o mais complexa possível
    - É difícil descobrir parte do texto em claro mesmo conhecendo outras
    - É difícil descobrir parte ou toda a chave usada para produzir um criptograma
  - Difusão
    - Cada bit de informação do texto original deve influenciar vários bits do criptograma
    - Pequena alteração no texto original implica grandes alterações no criptograma

14

Conceitos teóricos

- Boas práticas:
  - Criptanalista conhece o algoritmo de cifra e as suas fragilidades
    - Segurança baseia-se no desconhecimento da chave
    - Tem de ser baseado em matemática sólida
    - Tem de ter sido analisado por vários especialistas
    - Tem de ter passado no teste do tempo
  - Criptanalista pode capturar todos os criptogramas
  - Criptanalista conhece partes do texto original

Sumário

- Introdução
- Criptografia e criptanálise
- Evolução da tecnologia de cifra
- Tipos de cifra
  - Cifras de transposição
  - Cifras de substituição
    - Monoalfabéticas
    - Polialfabéticas
- Conceitos teóricos
- **Cifras modernas**
  - **Cifras simétricas**
  - Modos de operação
    - Cifras por blocos
    - Cifras Contínuas
  - Cifras assimétricas
  - Cifras híbridas
  - Funções de síntese
  - Autenticação
    - MACs
    - Assinaturas digitais

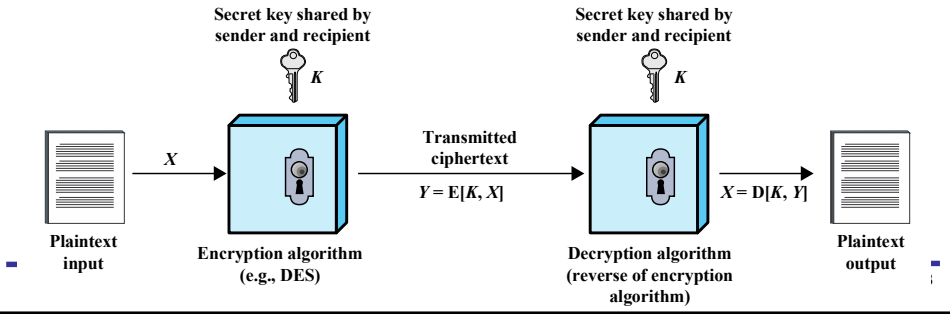
Cifras modernas

- Tipo de chave
  - Cifras simétricas
    - Chave secreta
    - Confidencialidade
    - Eficientes
    - N utilizadores e distribuição segura de chaves ☹
  - Cifras assimétricas
    - Par de chaves
    - Confidencialidade, autenticidade
    - Não eficientes
    - N utilizadores ☺
    - Distribuição de chaves públicas
  - Cifra híbrida
    - Cifra com chave simétrica
    - Distribuição de chave simétrica com cifras assimétricas
    - **Porquê?**
- Modo de operação
  - Cifras por blocos
  - Cifras contínuas

17

Criptografia Simétrica

- Também denominada de chave partilhada ou de chave secreta
  - chave de cifrar e decifrar iguais
  - bastante rápida
- Propriedade fundamental: D(K, E(K, m)) = m
- Cifras simétricas por blocos
  - *Data Encryption Standard* (DES) (1977);
  - *Triple-DES*;
  - International Data Encryption Algorithm (IDEA);
  - *Advanced Encryption Standard* (AES) (2000)
- Cifras simétricas contínuas



18

Ataques a cifras simétricas

- Criptanálise
  - Algoritmo
    - Deduzir texto em claro específico
    - Deduzir a chave
  - Conhecimento de características do texto em claro
  - Exemplos de pares texto em claro/criptograma
  - Se a chave for comprometida
    - Compromete mensagens passadas e futuras cifradas com a chave
- Ataques de força bruta
  - Tenta todas as chaves
  - Em média, tem de tentar metade das chaves

Criptografia Simétrica – ponto de situação

- Em 1998 foi publicado o primeiro projecto de um sistema computacional e do software associado capaz de quebrar qualquer texto cifrado pelo **DES** em poucos dias
- Muitos desafios foram lançados para quebrar mensagens específicas cifradas com o DES
  - A maioria foi resolvida rapidamente usando computadores paralelos distribuídos (que são/eram muito caros!.....)
- Por outro lado, o **IDEA** tem resistido à passagem do tempo…
- O NIST seleccionou o algoritmo **Rijndael** como seu *Advanced Encryption Standard* (AES), o sucessor do DES
  - Desenhado para resistir a ataques bem sucedidos ao DES

DES - *Data Encryption Standard*

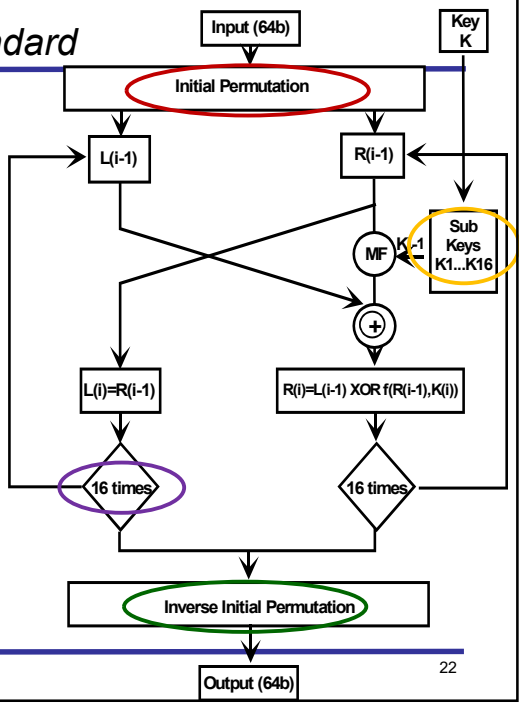
- Criado em **1977** pelo governo americano com o objectivo de ser um algoritmo normalizado para cifrar/decifrar dados sensíveis, mas não classificados.

- Problemas:
  - Chaves pequenas (**56 bits**)
  - Alguns passos do algoritmo não se sabe o porquê de existirem
  - Muitos algoritmos para "quebrá-lo" já foram desenvolvidos
  - Em **1998** foi apresentado um sistema que quebrava o DES em quatro dias
  - Ficou claro que ele já não era uma solução de segurança viável

- É um marco histórico

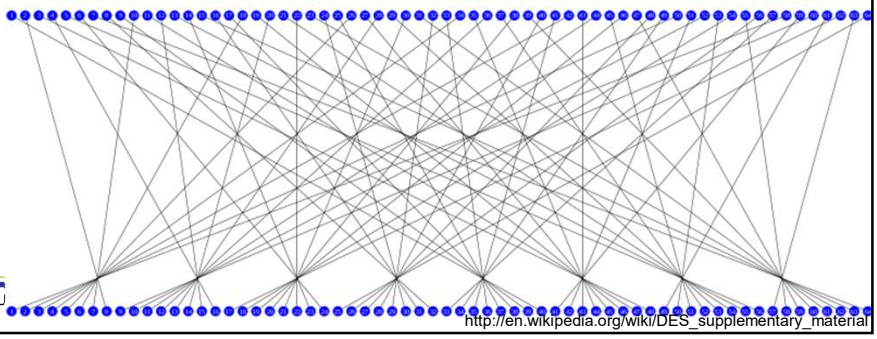
DES - *Data Encryption Standard*

- PRINCÍPIO:
  - cifrar em blocos de 64 bits de texto em claro, com chave *K* de 56 bits
  - produz 64 bits de texto cifrado
- OPERAÇÃO DE CIFRAR:
  - **permutação inicial *P* dos 64bits;**
  - **Geração de subchaves**
  - **16 iterações de transformação;**
  - **permutação final, inversa de *P***
  - **Princípio de difusão e confusão**
- TRANSFORMAÇÃO:
  - Isto é uma Estrutura de Feistel
  - **$L_i = R_{i-1}$;**
  - **$R_i = L_i$ XOR $f(R_{i-1},K_i)$**
  - Sendo:
    - ***f*, função que faz substituição e permutação;**
    - **K_i, chave temporária de 48bits usada na iteração I** (produzida a partir de *K* e *i*)
- OPERAÇÃO DE DECIFRAR:
  - mesmas operações, com as chaves em ordem inversa



DES – alguns detalhes – Permutação Inicial

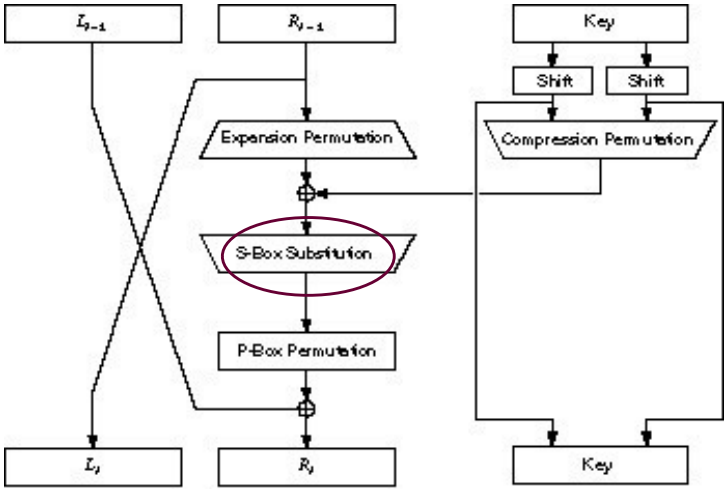
- 58 50 42 34 26 18 10 2 60 52 44 36 28 20 12 4
  62 54 46 38 30 22 14 6 64 56 48 40 32 24 16 8
  57 49 41 33 25 17 9 1 59 51 43 35 27 19 11 3
  61 53 45 37 29 21 13 5 63 55 47 39 31 23 15 7
- O bit 58 do texto em claro é colocado na posição 1
- O bit 50 do texto em claro é colocado na posição 2
- …



http://en.wikipedia.org/wiki/DES_supplementary_material

23

DES – alguns detalhes – geração de subchaves

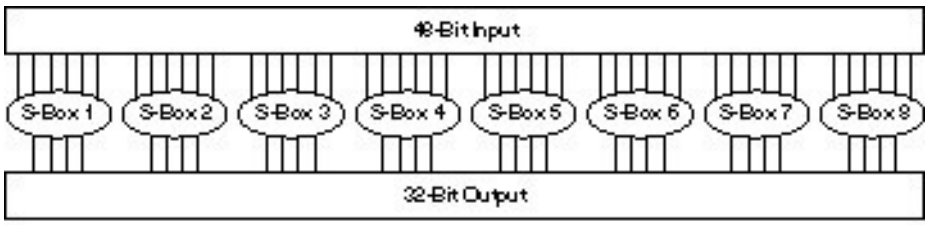


Round number	Number of left shifts
1	1
2	1
3	2
4	2
5	2
6	2
7	2
8	2
9	1
10	2
11	2
12	2
13	2
14	2
15	2
16	1

 24

24

DES – alguns detalhes – SBOX substitution



S-boxes

S_1

	x0000x	x0001x	x0010x	x0011x	x0100x	x0101x	x0110x	x0111x	x1000x	x1001x	x1010x	x1011x	x1100x	x1101x	x1110x	x1111x
0yyyy0	14	4	13	1	2	15	11	8	3	10	6	12	5	9	0	7
0yyyy1	0	15	7	4	14	2	13	1	10	6	12	11	9	5	3	8
1yyyy0	4	1	14	8	13	6	2	11	15	12	9	7	3	10	5	0
1yyyy1	15	12	8	2	4	9	1	7	5	11	3	14	10	0	6	13

Exemplo: 110011_2 -> $11_{10} = 1011_2$

DES - *Data Encryption Standard*

- Problemas
  - Chaves pequenas (56 bits)
  - Não se conhece a justificação para alguns passos do algoritmo
  - 1998: é possível comprometer chaves DES em 4 dias
    - Força bruta
  - Chaves fracas, semi-fracas e potencialmente fracas
    - Pouco ou nada alteram o texto original
- Solução: Variantes do DES
  - Utilização de várias cifras
    - Dual DES
    - Triple DES

Dual DES

- Dual DES
  - usa 2 chaves: *K1* e *K2:*
    - "chaves" com *2n* bits
    - Cifra: $C = E(K_2, E(K_1, P))$
    - Decifra: $P = D(K_2, D(K_1, C))$
    - Problema: pode ser atacado com 2^{n+1} tentativas(vs as previstas: 2^{2n})
    - Como?
      0. Tenho um P e um C
      1.força bruta calcula E(K, P) para todas as K →2^n
      2.força bruta calcula D(K, C)
      e compara com os valores calculados em 1
      -- **meet-in-the-middle-attack**

Triple DES

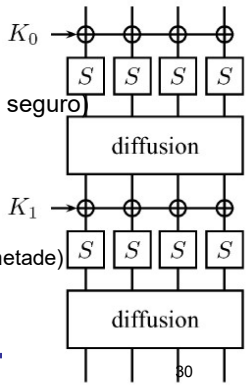
- Triple DES
  - Usa DES 3 vezes com 2 ou 3 chaves
  - Normalizado em 1985: ANSI standard X9.17
  - 2 chaves *K1* e *K2*:
    - Cifra: $C = E(K_1, D(K_2, E(K_1, P)))$
    - Decifra: $P = D(K_1, E(K_2, D(K_1, C)))$
  - 3 chaves:
    - Cifra: $C = E(K_3, D(K_2, E(K_1, P)))$
    - Decifra: $P = D(K_1, E(K_2, D(K_3, C)))$
    - Requer $O(2^{2n})$ cifras e $O(2^n)$ de memória com chaves de 56 bits
      Ataque muito difícil

IDEA - International Data Encryption Algorithm

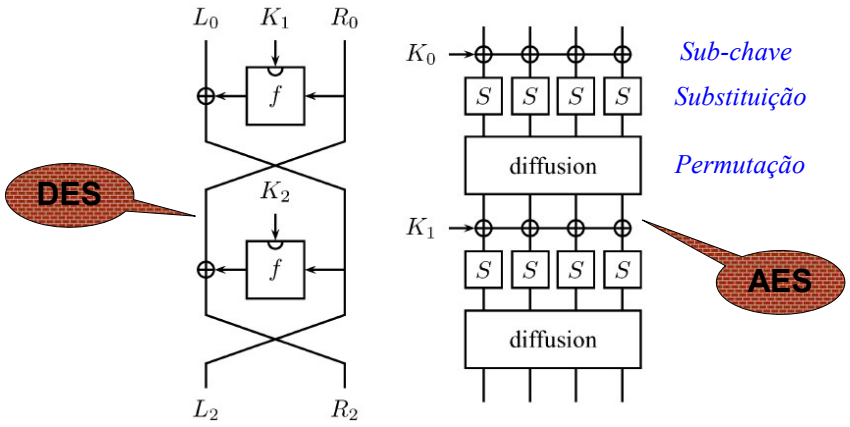
- Proposto em **1991** por investigadores da ETH Zurich
- Mais robusto que o DES
- usa chaves de **128** bits:
  - ataque força bruta requer 10^{38} cifrações
  - com chip de 10^{9} cifr/seg, requer 10^{13} anos
- Tão rápido quanto o DES:
  - Concretização em software: 386@33MHz faz 880Kbps
  - Concretização em hardware (chip da ETH Zurich) faz 177Mbps @25MHz
  - (agora escalem isso proporcionalmente aos processadores de hoje)
- Usado no PGP (*Pretty Good Privacy*)
- Nunca foi normalizado

AES - Advanced Encryption Standard

- Histórico:
  - Novo padrão do NIST para substituir o DES
  - Processo de seleção público (iniciado em 1997) onde se escolheu um algoritmo de entre vários candidatos
  - O escolhido foi o Rijndael – Novembro de 2001
- Princípios:
  - Recebe como entrada **blocos de 128 bits** de texto em claro
  - As chaves podem ter **128, 192, 256 bits** (quanto maior, mais seguro)
  - Produz blocos de 128 bits de texto cifrado
  - Funciona iterativamente
    - Cada bloco é dividido em 4 grupos de 4 bytes
    - Um bloco inteiro é modificado em cada iteração (no DES é só metade)
  - Rápida e eficiente em CPUs pequenos e grandes



AES - Advanced Encryption Standard



Estrutura de Feistel **Rede SP**

31

Cifras simétricas

Key size (bits)	Cipher	Number of Alternative Keys	Time Required at 10^9 decryptions/s	Time Required at 10^{13} decryptions/s
56	DES	$2^{56} \approx 7.2 \times 10^{16}$	2^{55} ns = 1.125 years	1 hour
128	AES	$2^{128} \approx 3.4 \times 10^{38}$	2^{127} ns = 5.3×10^{21} years	5.3×10^{17} years
168	Triple DES	$2^{168} \approx 3.7 \times 10^{50}$	2^{167} ns = 5.8×10^{33} years	5.8×10^{29} years
192	AES	$2^{192} \approx 6.3 \times 10^{57}$	2^{191} ns = 9.8×10^{40} years	9.8×10^{36} years
256	AES	$2^{256} \approx 1.2 \times 10^{77}$	2^{255} ns = 1.8×10^{60} years	1.8×10^{56} years

32

Sumário

- Introdução
- Criptografia e criptanálise
- Evolução da tecnologia de cifra
- Tipos de cifra
  - Cifras de transposição
  - Cifras de substituição
    - Monoalfabéticas
    - Polialfabéticas
- Conceitos teóricos
- Cifras modernas
  - Cifras simétricas
  - **Modos de operação**
    - **Cifras por blocos**
    - **Cifras Contínuas**
  - Cifras assimétricas
  - Cifras híbridas
  - Funções de síntese
  - Autenticação
    - MACs
    - Assinaturas digitais

33

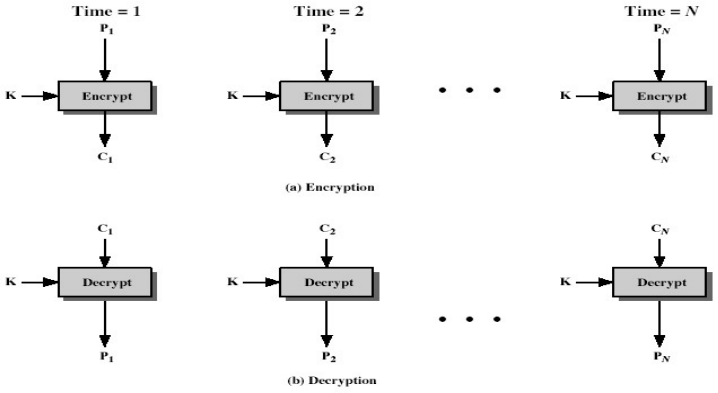
Modos de operação

- **Cifra por blocos**
  - Processa o texto em claro por blocos, um bloco em cada iteração
  - Produz um bloco por cada bloco de entrada
  - Pode reusar chaves
- Cifras contínuas
  - Processa o texto em claro de forma contínua
  - Normalmente mais rápidas

34

Modos de Cifra por Blocos

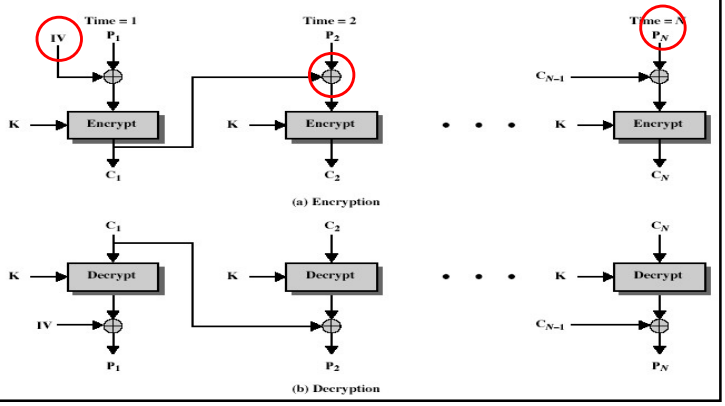
- ECB - *Electronic CodeBook*
  - cifra por blocos independentes
  - Fraquezas
    - Reprodução de padrões de texto original – dois blocos iguais produzem o mesmo criptograma
    - Vulnerável a ataques de reordenação ou *replay*



35

Modos de Cifra por Blocos

- CBC - *Cypher Block Chaining*
  - O texto em claro é "XOR" com o texto cifrado do bloco anterior antes de ser cifrado
  - Reduz risco de replicação de padrões
  - Initialization Vector (IV): usado no 1º bloco (necessário para decifrar -> ver API do Java)
  - *Padding*: bits para compor blocos inteiros do tamanho requerido pelo algoritmo



36

Modos de cifra por bloco - padding

- Modos de cifra: ECB e CBC
  - Iso10126
    - Exemplo: Blocos de 8 bytes e texto em claro 0x616263
    - Texto com padding 0x616263????????**05**
  - PKCS7
    - Exemplo: Blocos de 8 bytes e texto em claro 0x616263
    - Texto com padding 0x6162630505050505
  - Bit padding
    - 1011 1001 1101 0100 0010 011**1 0000 0000**

37

Modos de operação

- Cifra por blocos
  - Processa o texto em claro por blocos, um bloco em cada iteração
  - Produz um bloco por cada bloco de entrada
  - Pode reusar chaves
- **Cifras contínuas**
  - Processa o texto em claro de forma contínua
  - Normalmente mais rápidas

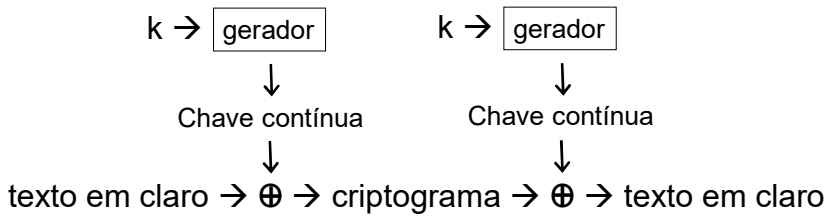
38

Cifras contínuas

- XOR (Exclusive OR)
  - (A XOR B) XOR A) = B
- Operação:
  - Geração da chaves em tempo real por uma black box
  - **Chaves usadas apenas uma vez**
    - Atenção- ver WEP, fraquezas de RC4 (usado em SSL e WAP)
  - Distribuição?
    - A chave contínua é gerada em simultâneo em ambos os pontos – sincronização
    - Black boxes são parametrizadas por uma **master key**
  - Cifra/decifra
    - Processa um bit/byte de cada vez, continuamente

39

Cifras contínuas

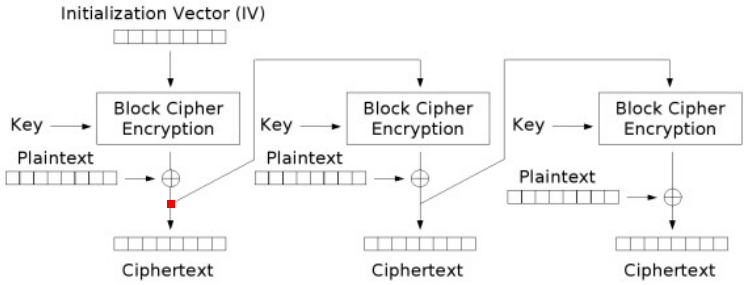


- Usam chaves contínuas
- Usam princípio da confusão (não da difusão)
- As chaves não devem ser **reusadas**
  - Porquê ?
- O período de uma chave contínua deve ser o mais longo possível
  - Porquê ?
- A sequência de bits de uma chave contínua deve aparentar ser aleatória

40

Cifras contínuas

- CFB - *Cypher Feedback*
  - Transforma **cifra por blocos em cifra contínua**
  - Vantagens sobre o CBC:
    - a cifra de bloco só é utilizada na direcção de cifrar (independentemente de a operação ser cifrar ou decifrar) o que simplifica a sua implementação, e
    - a mensagem não necessita de ser "padded" para um múltiplo do tamanho do bloco porque o algoritmo trabalha com qualquer quantidade de bytes

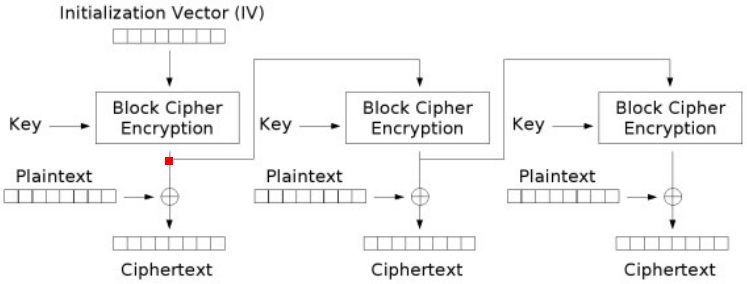


Cipher Feedback (CFB) mode encryption

41

Cifra contínuas

- OFB – *Output Feedback*
  - Mantém as vantagens do CFB e ainda acrescenta outra
    - a mensagem não é utilizada para iniciar o bloco seguinte, o que implica que as operações de cifra de bloco podem ser feitas **antecipadamente** permitindo que o último passo seja realizado em paralelo assim que o texto (mensagem ou mensagem cifrada) estiver disponível

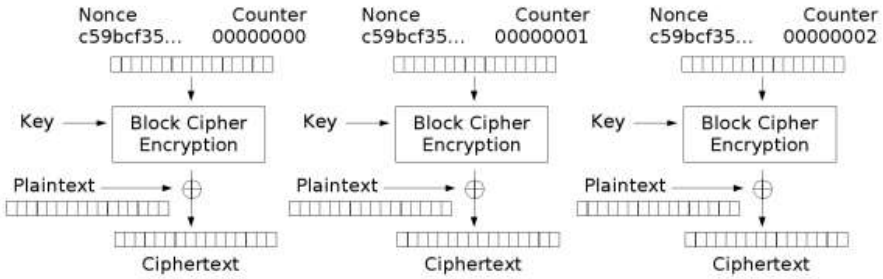


Output Feedback (OFB) mode encryption

42

Cifra contínuas

- CTR (counter)
  - Apresentado por Diffie e Hellman em 1979
  - Modo de cifra padrão para o AES
  - Nonce+contador devem ser diferentes em cada operação de cifra
    - Caso seja usada a mesma chave e o mesmo nonce+contador para cifrar dois conteúdos diferentes, eles serão cifrados com duas chaves contínuas iguais ☹



Counter (CTR) mode encryption

43

Cifras simétricas contínuas

- Requisitos de robustez:
  - Secretismo, aleatoriedade e uso único da **chave de fluxo**
  - A chave de fluxo precisa ser distribuída nas duas pontas do canal
- Uso em sistemas reais:
  - Em comunicação, a *chave de fluxo* é uma **sequência pseudo-aleatória** produzida em tempo-real à velocidade do fluxo de texto, por uma caixa-preta;
  - A chave de fluxo é gerada nos dois extremos em simultâneo (as duas caixas pretas são sincronizadas)
  - A chave de fluxo é parametrizada por uma chave mestra
  - É susceptível a erros de bits, que podem dessincronizar o fluxo
  - Exemplo de algoritmo: RC4 (usado no SSL e no WAP)

 44

44

Modos de cifra - comparação

- Reforço de segurança
  - Esconder padrões de texto original
    - exemplo: ECB ☹
  - Confusão na entrada da cifra
    - exemplo : CBC com realimentação de bits do criptograma
  - Possibilidade de reutilização de uma chave de cifra
    - Cifras contínuas – cuidado !
  - Alteração determinística do texto em claro através da manipulação do criptograma
    - Cifra contínua – fácil
- Optimização
  - Efectuar pré-processamento
    - Exemplos: OFB e CTR
  - Paralelização do modo de cifra
    - Exemplos: ECB, CTR
- Tolerância a faltas
  - Propagação de erros
    - Exemplo: ECB – erro num bit apenas afecta o respectivo criptograma
  - Recuperação de sincronismo de perda de bits

45

Criptografia Simétrica – vantagens/desvantagens

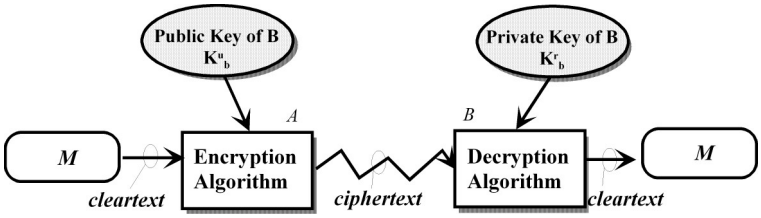
- Chave secreta
  - se perdida ou revelada em qualquer ponta, o canal é comprometido
- Distribuição de chaves
  - O problema do ovo e da galinha: *"como distribuir a chave para ter canais seguros sem ter canais seguros?"*
  - E se as chaves precisarem de ser mudadas frequentemente
- Gestão de chaves
  - Grande escala ☹
  - Comunicação arbitrária entre 10 participantes requer 45 chaves
  - 100 participantes -> quase 5000
  - *(n(n-1)/2)* chaves são requeridas para *n* participantes
- Eficientes

46

Sumário

- Introdução
- Criptografia e criptanálise
- Evolução da tecnologia de cifra
- Tipos de cifra
  - Cifras de transposição
  - Cifras de substituição
    - Monoalfabéticas
    - Polialfabéticas
- Conceitos teóricos
- Cifras modernas
  - Cifras simétricas
  - Modos de operação
    - Cifras por blocos
    - Cifras Contínuas
  - **Cifras assimétricas**
  - **Cifras híbridas**
  - Funções de síntese
  - Autenticação
    - MACs
    - Assinaturas digitais

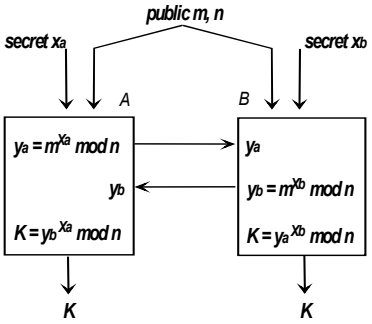
Criptografia Assimétrica



- Também chamada de cifra de chave pública
  - Cifra com chave pública K_u e decifra com chave privada K_r
  - Em geral é muito mais lenta que a criptografia simétrica
- PRINCÍPIO:
  - Usam problemas matemáticos, para os quais não existe solução em tempo polinomial, aplicados a grande números – factorização, cálculo de logaritmos discretos e knapsacks
- PROPRIEDADES:
  - $D(K_r,E(K_u,m))=m$ e $E(K_u,D(K_r,m))=m$
- Exemplos de Algoritmos:
  - Diffie-Helmann, para calcular um número secreto partilhado (1976); Rivest-Shamir-Adleman (RSA) (1978), ElGamal

Criptografia Assimétrica - Diffie-Hellman

- PRINCÍPIO:
  - Lançou as bases para criptografia assimétrica em 1976
  - É baseado em uma *one-way function* (função irreversível) e na dificuldade em factorizar números resultantes do produto de números primos grandes
- OBJECTIVO:
  - Obter um número secreto K, partilhado entre A e B, sem o comunicar em claro
- OPERAÇÃO:
  - escolher dois números primos *m* e *n* públicos (n grande)
  - A gera um número aleatório x_a
  - A calcula $y_a = m^{x_a} \text{ MOD } n$
  - B gera um número aleatório x_b
  - B calcula $y_b = m^{x_b} \text{ MOD } n$
  - y_a e y_b são tornados públicos
  - Cada um calcula *K* localmente
  - $K = y_b^{x_a} \text{ MOD } n = y_a^{x_b} \text{ MOD } n = m^{x_a x_b} \text{ MOD } n$

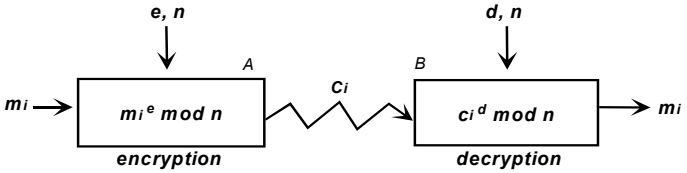


Segurança do Diffie-Hellman

- A segurança do Diffie-Hellman é baseada na dificuldade em se resolver o seguinte problema:
  - Dado um elemento *m* e os valores m^x e m^y, qual o valor de m^{xy}?
- Isto é equivalente ao calculo de logaritmos discretos:
  - $x = \log_m {}^{mx}$
  - $y = \log_m {}^{my}$

  (seria relativamente simples se não estivessemos a falar de aritmética modular – lembrem-se dos *"mod n"* nas fórmulas)

Criptografia Assimétrica - RSA



- Foi publicado em 1977 por três investigadores do MIT: Rivest, Shamir e Adleman (RSA)
- Pode ser usado tanto para cifrar quanto para assinar

Criptografia Assimétrica - RSA

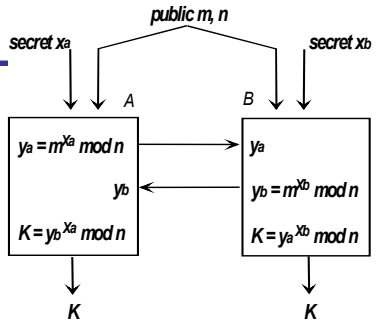
É mais lento à medida que *d* e *e* crescem:
(*d* é geralmente grande enquanto *e* é pequeno)

- Gerar Chaves:
  - Escolhe dois números primos grandes *p, q*
  - Considere $n = pq$ e $z = \phi(n) = (p-1)(q-1)$
  - Escolha $e < n$ tal que *e* é primo relativo (não tem factores em comum) de $z = \phi(n)$
  - Calcula *d* tal que $ed \ MOD \ z = 1$
  - chave pública: $K_u = (e, n)$; chave privada: $K_r = (d, n)$
- Cifrar:
  - $E(K_u,m) = m^e \ MOD \ n = c$
- Decifrar:
  - $D(K_r,c) = c^d \ MOD \ n = m$

Criptografia Assimétrica - RSA

- Criptanálise:
  1. Procura de chaves “à bruta”
     - Inexequível se usarmos chaves grandes (≥ 1024 bits)
  2. Ataques matemáticos
     - *d* é fácil de calcular a partir de *e* se forem conhecidos *p* e *q* -> factorização de nºs grandes
     - Determinar *m* a partir de *c*, *e* e *n* -> Função inversa da exponenciação modular: logaritmo modular
     - ainda seguro com chaves ≥ 1024 bits
  3. Ataques temporais (*timing attacks*) na execução da operação de decifração
     - Consegue estimar *d* pelo tempo que demora uma decifração

Criptografia Assimétrica



- El Gamal
  - Baseado em Diffie-Helman
  - Atenção: Bob deve escolher o k aleatório diferente para cada mensagem que envia para Alice.
  - Chave pública de Alice: m, n, y_a
  - Bob calcula x_b, cifra a mensagem com K e envia y_b para Alice
- Elliptic curve cryptography (ECC)
  - Tão segura quanto RSA, mas com chaves menores
  - Elliptic curve Diffie–Hellman (ECDH)
    - Chave de sessão em canal inseguro
    - https://www.youtube.com/watch?v=F3zzNa42-tQ

Criptografia Assimétrica - vantagens/desvantagens

- Eficiência ☹
- Escala ☺
- Distribuição da chaves públicas – cuidado !
  - autenticidade das chave públicas
  - Como saber se afirmações do tipo “12DH457B6A9 é chave pública do Pedrinho” são verdadeiras?
  - Um chave pública a ser enviada pode ser interceptada e substituída…
  - Ou, se uma base de dados de chaves públicas (PKI ou CA) é comprometida, qualquer chave armazenada pode ser substituída por uma chave falsa criada pelo atacante
  - A definição de **autoridades de certificação** (alguém que certifique a autenticidade das chaves) é necessária

55

Cifras híbridas

- Cifras simétricas
  - eficientes☺
  - escala☹
- Cifras assimétricas
  - eficientes☹
  - escala☺
- Cifras híbridas
  - Troca de chaves simétricas com cifras assimétricas

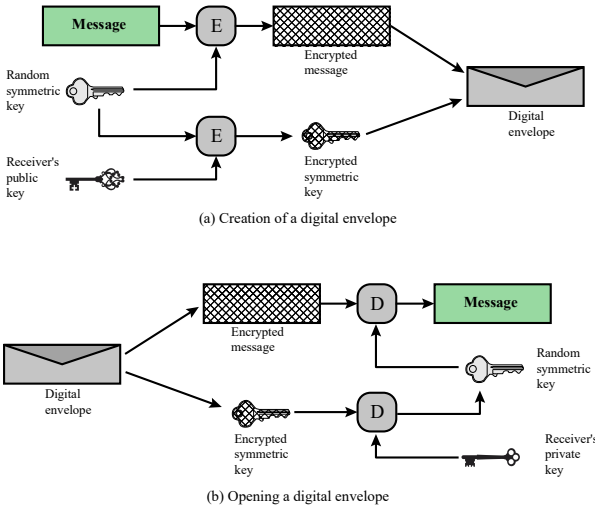


Figure 2.8 Digital Envelopes

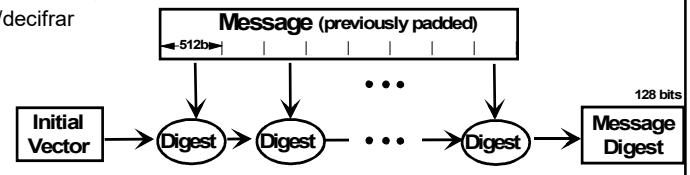
56

Sumário

- Introdução
- Criptografia e criptanálise
- Evolução da tecnologia de cifra
- Tipos de cifra
  - Cifras de transposição
  - Cifras de substituição
    - Monoalfabéticas
    - Polialfabéticas
- Conceitos teóricos
- Cifras modernas
  - Cifras simétricas
  - Modos de operação
    - Cifras por blocos
    - Cifras Contínuas
  - Cifras assimétricas
  - Cifras híbridas
  - **Funções de síntese**
  - **Autenticação**
    - **MACs**
    - **Assinaturas digitais**

Síntese Segura ou *Digest* de Mensagens

- Objectivo
  - Produzem valores de dimensão constante a partir de entradas (mensagens, ficheiros, …) de dimensão variável
  - A função de compressão é aplicada de forma iterativa
    - 2 argumentos de entrada da função de compressão: síntese prévia, bloco a processar
  - Não servem para cifrar/decifrar



- Propriedades
  - Resistência à descoberta do texto original
    - Dada a síntese H, é muito difícil descobrir um texto M, tal que H = h(M)
  - Resistência à descoberta de um segundo texto original
    - Dado um Texto M, é muito difícil descobrir M'(M'≠M) tal que h(M)=H(M')
  - Resistência à colisão
    - É difícil descobrir dois textos quaisquer, M e M', M'≠M, tais que h(M) = h(M')
- Exemplos de Funções: MD5, SHA-1, SHA-256

Funções de síntese: Resistência à colisão

- Dimensão das sínteses
  - Com sínteses de 128 bits e mensagens 1000 bits: ~ 2^{872} mensagens dão origem à mesma síntese
  - Síntese >= 128 bits
- Ataque do Aniversário (*Birthday attack*):
  - Baseia-se no "paradoxo do aniversário" e é usado para encontrar um par de mensagens com a mesma síntese (colisão)
  - Para sínteses de n bits, o atacante deve tentar aproximadamente $2^{n/2}$ mensagens
  - In a group of at least 23 randomly chosen people, there is more than 50% probability that some pair of them will have the same birthday. Such a result is counter-intuitive to many.

Síntese Segura - MD5

- Proposto por Ron Rivest (investigador do MIT)
- O último de uma série de funções MD2, MD4, …
- Produz um valor de síntese de 128 bits
- Até recentemente era a função de síntese segura mais usada
  - Recentemente foram encontradas falhas tanto através de ataques de força bruta quanto por criptanálise
- Não é **recomendada a sua utilização**
- Especificado num padrão IETF (RFC1321)

Síntese Segura- *Secure Hash Algorithm* (SHA-1)

- Proposto pelo NIST e pela NSA
- SHA-1
  - Produz sínteses de 160 bits
  - Não seguro
- SHA-2
  - SHA-256
  - SHA-512
  - SHA-224 e SHA-384
- SHA-3
  - Dimensões idênticas a SHA-2
  - 2012
- Existem diversas versões do SHA. Estas são mais seguras na medida em que o tamanho da síntese produzida aumenta

Síntese Segura - versões do SHA

	SHA-1	SHA-256	SHA-384	SHA-512
Message digest size	160	256	384	512
Message size	$< 2^{64}$	$< 2^{64}$	$< 2^{128}$	$< 2^{128}$
Block size	512	512	1024	1024
Word size	32	32	64	64
Number of steps	80	80	80	80
Security	80	128	192	256

SEGURO

Notes: 1. All sizes are measured in bits.
2. Security refers to the fact that a birthday attack on a message digest of size n produces a collision with a workfactor of approximately $2^{n/2}$.

Sínteses seguras

- Password
  - Armazenamento de passwords
- Deteção de intrusões
  - Guardar a hash dos ficheiros do SO
- O que obtemos e como ?
- Outras aplicações
  - Slides seguintes

MAC - Message Authentication Code

- Funções de síntese – integridade
- Message Autentication Code – MAC
  - Usa **chave secreta** partilhada
  - O que garante ?
  - Como produzir MACs
    - Cifrar mensagem e síntese da mensagem
    - Cifrar síntese da mensagem ☹
    - Funções chaveadas
      - Funções de cifra por blocos: DES-MAC (criptograma gerado em modo CBC)
      - Funções de cifra contínua
      - Funções de síntese - HMAC

HMAC - *Hash Message Authentication Code*

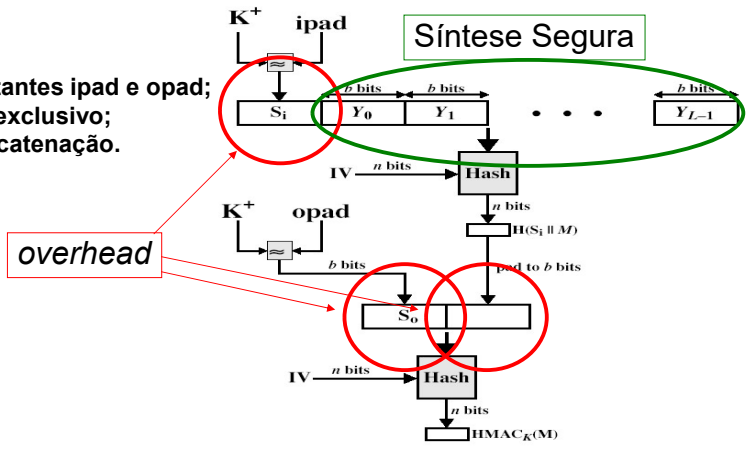
- Definido no RFC2104 do IETF
- Utiliza funções de síntese na mensagem:
- $H_k(m) = \boldsymbol{h}(k' \oplus opad \,||\, \boldsymbol{h}(k' \oplus ipad \,||\, m))$
  - $\oplus$ ou exclusivo
  - || concatenação
  - K' é a chave K preenchida (*padded*) para ter o tamanho de um bloco
  - *opad* e *ipad* são constantes específicas de preenchimento
  - Overhead é de apenas mais 3 execuções da função de síntese em relação à geração do *digest* da mensagem
- Qualquer função de síntese segura pode ser usada no HMAC.
- A segurança e a eficiência do algoritmo dependem da função de síntese segura usada.
- A função de síntese pode ser substituída com o fim de melhorar segurança e/ou eficiência.

65

HMAC - *Hash Message Authentication Code*

$$H_k(m) = h(k' \oplus opad \,||\, h(k' \oplus ipad \,||\, m))$$

onde:
- **Constantes ipad e opad;**
- **$\oplus$ ou exclusivo;**
- **|| concatenação.**



66

MAC - Message Authentication Code

- MAC:
  - Alice e Beto compartilham uma chave *k*
  - Alice envia *m* || $H_k(m)$ para Beto
  - Beto verifica que recebeu *m* de Alice
- E perante terceiros?
- Beto pode provar que foi Alice que enviou ?

ERRADO!

- Isto não é uma assinatura digital!
  - Uma terceira parte não pode determinar se foi Alice ou Beto quem gerou a mensagem
  - i.e., não satisfaz a propriedade de não-repudiação

Assinaturas Digitais

- Autenticidade
  - quem assinou é identificável univocamente pela assinatura
- Integridade
  - uma assinatura correcta num documento garante que este não é alterável sem detecção
  - Não-reutilização
    - a assinatura ou parte do documento não é reutilizável em outro documento
- Não-repudiação
  - o assinante não pode negar a sua assinatura
  - Não-forjamento
    - quem assinou é o próprio e fê-lo deliberadamente

Assinaturas Digitais

- Modo de operação
  - Cifrar com chave privada a síntese do texto original
  - Algoritmos de assinatura mais usados
    - RSA
    - DSA

- DSS/DSA
  - Proposta de assinaturas digitais do NIST (1991)
  - Digital Signature Standard (DSS)
  - Digital Signature Algorithm (DSA)
    - derivado do algoritmo de assinatura ElGamal

Assinaturas às cegas

- Assinaturas às cegas
  - David Chaum, 1982
  - Garante o anonimato de quem solicita a assinatura e do que é efectivamente assinado
  - Utilidade
    - Dinheiro electrónico
      - Pagamentos anónimos
    - Votação electrónica

- Exemplo com RSA
  - K aleatório

1. Obscurecer: $m' = k^e . m \bmod n$
2. Assinar: $A(m') = (m')^d \bmod n$
3. Anular 1: $A = k^{-1} . A(m') \bmod n$

$$k^{-1} . A(m') \equiv k^{-1} . (m')^d$$
$$\equiv k^{-1} . (k^e . m)^d$$
$$\equiv k^{-1} . k^{ed} . m^d$$
$$\equiv k^{-1} . k . m^d$$
$$\equiv m^d \pmod n$$

Cifras homomórficas

- Decifra(Operação(**criptograma**))=Operação'(texto em claro)
- $f(a \oplus b) = f(a) \otimes f(b)$

- Exemplo
  - RSA multiplicação

    $E(a).E(b)=a^e b^e \bmod n = (ab)^e \bmod n = E(ab)$

- Casos de uso
  - Verificação de vírus sem decifra ficheiros
  - Pesquisa em ficheiros cifrados (na nuvem)

Números aleatórios

- Usos
  - Chaves, ….

- Aleatório
- Imprevisível

- Pseudo-aleatório

Bibliografia

- Segurança em Redes Informáticas
  - Cap 2
- Computer Security Principles and Practice
  - Cap 2, 20, 21