

Capítulo 5 – Criptografia

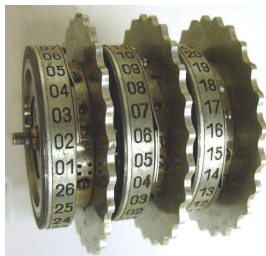
- 5.1 – Introdução
- 5.2 – Criptografia - algoritmos e chaves
- 5.3 – Tipos de criptografia
 - 5.3.1 – Criptografia simétrica
 - 5.3.2 – Criptografia assimétrica
 - 5.3.3 - Funções *hash*
- 5.4 – Assinaturas digitais
- 5.5 – Certificação digital
- 5.6 – Exemplo completo

5.1 – Introdução

- ***Criptografia*** é a ciência de escrever e ler mensagens cifradas.
- É a base de muitas aplicações que envolvem segurança digital:
 - autenticação
 - comunicação segura
 - dinheiro eletrônico
 - certificados digitais
 - identidade digital
 - assinatura digital
 - etc

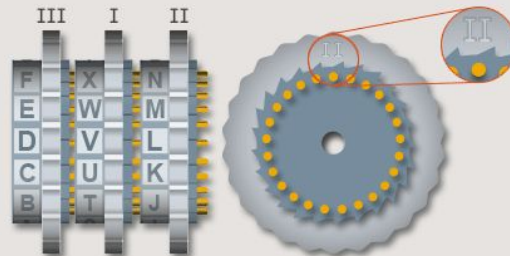
- Com a criptografia é possível garantir três propriedades básicas de segurança:
 - ***autenticação***
 - ***integridade***
 - ***confidencialidade***
- ***Criptoanálise***: ciência de quebrar códigos e decifrar informação sem conhecer a chave
- Criptografia e criptoanálise evoluem à medida que novos processadores mais rápidos são criados
- Começou no Império Romano, com Júlio César
- Evoluiu bastante na Segunda Guerra Mundial:
 - Alemães tinham a necessidade de enviar mensagens secretas
 - Os aliados desenvolveram máquinas para “quebrar” a criptografia dos alemães

➤ Enigma:



Antes de dezembro de 1938, três discos eram usados e marcados como I, II e III. Depois os alemães acrescentaram mais dois discos, o IV e V, multiplicando por dez o número de combinações possíveis.

Cada disco tem 26 letras (de A a Z), resultando num número de combinações de qualquer conjunto de três discos em $26 \times 26 \times 26 = 17.576$



Mas os três discos podem ser organizados em seis seqüências diferentes, totalizando o número de combinações em $26 \times 26 \times 26 \times 6 = 105.456$

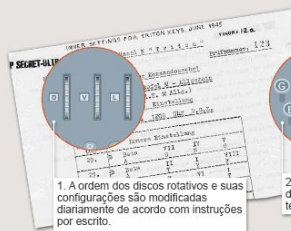


E com cinco discos, existem 60 possíveis seqüências, resultando no número total de $26 \times 26 \times 26 \times 60 = 1.054.560$ combinações.



© DW

Codificando e descodificando mensagens



1. A ordem dos discos rotativos e suas configurações são modificadas diariamente de acordo com instruções por escrito.



2. A mensagem é datilografada em um texto sem espaços

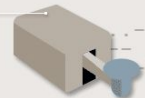


3. A mensagem criptografada é exibida no painel luminoso...

ANKUNFTDES FUEHRERS IN BERLIN UM MITTERNACHT*
ULETVZRQQVMRHKLNKNGNESPHJMJGHHHPCQGXPRQ

© DW

4. ...e então transmitida via rádio.



5. As transmissões são facilmente interceptadas por receptores de rádio



6. O destinatário define as posições iniciais dos discos do mesmo modo que o remetente



7. O destinatário datilografa a mensagem cifrada para recuperar o texto sem espaços...



8. ...que acende no painel luminoso.

* Tradução livre: "O Führer chega a Berlim à meia-noite"

© DW

5.2 – Criptografia - algoritmos e chaves

- Elementos básicos indispensáveis à criptografia:
 - **Algoritmo de criptografia:** função matemática usada para cifrar e reverter o processo
 - **Chave:** valor secreto necessário para realizar as operações de criptografia. É composta de um número específico de bits
- Um bom algoritmo de criptografia é aquele conhecido publicamente e cuja segurança foi atestada por um grande número de criptoanalistas
- Sem um algoritmo e pelo menos uma chave não é possível realizar criptografia

- Quanto maior a chave, mais difícil é o sucesso de um ataque de força bruta
 - Ataque de força bruta consiste em testar todas as combinações possíveis de chave, no intuito de encontrar a chave certa para decifrar a informação
- Quanto maior o tamanho da chave, maior a segurança da criptografia, maior o tempo necessário para cifrar e decifrar a informação
 - um valor ótimo é definido de acordo com a capacidade de processamento dos computadores da época
 - de tempos em tempos o tamanho da chave deve ser aumentado

5.3 – Tipos de criptografia

- Algoritmos de criptografia são divididos em três categorias distintas:
 - ***Algoritmos simétricos:*** criptografia de chave privada
 - ***Algoritmos assimétricos:*** criptografia de chave pública
 - ***Funções hash***

5.3.1 – Criptografia simétrica

- Utiliza a mesma chave para cifrar e decifrar uma mensagem
- Nesse caso, a chave precisa ser pré-combinada entre os participantes da criptografia
- A chave deve ser mantida em segredo entre os participantes
- Não deve ser transmitida via Internet, pois o risco de alguém farejar a rede e se apoderar da chave é muito grande
 - utiliza-se disquetes, cd-roms, pendrives entregues pessoalmente ao destinatário => *out of band*
- Quando for necessária a transmissão via rede, outros métodos de criptografia devem ser utilizados em conjunto para a transmissão dessa chave

- Normalmente, os algoritmos simétricos operam em blocos de mensagem de 64 bits cada
 - necessário quebrar a mensagem em blocos de 64 bits e agrupá-los de alguma forma
- Existem 4 métodos de combinar a mensagem original, a chave e a mensagem cifrada:
 - **ECB:** cifra cada bloco de 64 bits de forma independente, usando a mesma chave
 - não é considerado seguro
 - uma mesma mensagem cifrada várias vezes vai gerar sempre o mesmo código
 - **CBC:** cada bloco depende do resultado do bloco anterior, ou seja, utiliza-se o bloco anterior no processo de cifragem do bloco seguinte
 - o método deve garantir que todos blocos cheguem corretamente, pois um erro em um bloco se propagará para todos os outros blocos

- **CFB:** capaz de cifrar dados de qualquer tamanho, independente do bloco
 - útil para cifrar pequenas quantidades de informação, ou informações que devem ser imediatamente transmitidas independentemente de completar um bloco ou não
- **OFB:** Parecido com o CBC, porém não existe dependência entre os blocos
 - múltiplas cifragens da mesma mensagem produzem mensagens diferentes, ainda que utilizando a mesma chave

➤ Algoritmos conhecidos de criptografia simétrica:

- DES, 3DES, RC-4, IDEA, e o AES

DES e 3DES

- Foi, por muitos anos, o algoritmo padrão para criptografia simétrica
- Opera com blocos de 64 bits
- Na sua forma padrão, usa chave de 64 bits:
 - 56 bits são randômicos e 8 são bits de paridade para verificar a integridade da chave
- Pode ser usado nos quatro modos: ECB, CBC, CFB e OFB
- Variação do DES de 40 bits:
 - criada pelo governo americano para permitir seu uso fora dos EUA
 - na época, os EUA não permitiam a exportação de qualquer sistema de criptografia com mais de 40 bits de chave
 - era o próprio algoritmo DES, sendo que 24 bits da chave eram fixos

- 3DES é outra variação do DES, com o intuito de dificultar os ataques de força bruta
- Realiza 3 operações em um bloco de 64 bits: cifra, decifra e cifra de novo
- Pode usar uma, duas ou três chaves diferentes
- É comum ouvir que o 3DES usa uma chave de 192 bits, visto que pode usar 3 chaves de 64 bits diferentes
- Não é tão seguro quanto um algoritmo que efetivamente use uma chave de 192 bits
- Tanto o DES quanto o 3DES são públicos e sua especificação pode ser encontrada em:
 - <http://www.umich.edu/~x509/ssleay/fip46/fip46-2.htm>

RC-4

- Algoritmo proprietário criado pelo MIT
- É de propriedade da RSA Data Security
- Normalmente usa chave de 128 bits

IDEA

- Surgiu com o propósito de substituir o DES
- Opera em blocos de 64 bits
- Usa chave de 128 bits
- Pode operar nos quatro modos: ECB, CBC, CFB e OFB
- Desenvolvido para ser eficiente tanto em hardware quanto em software
- Patenteado e requer licença de uso

AES

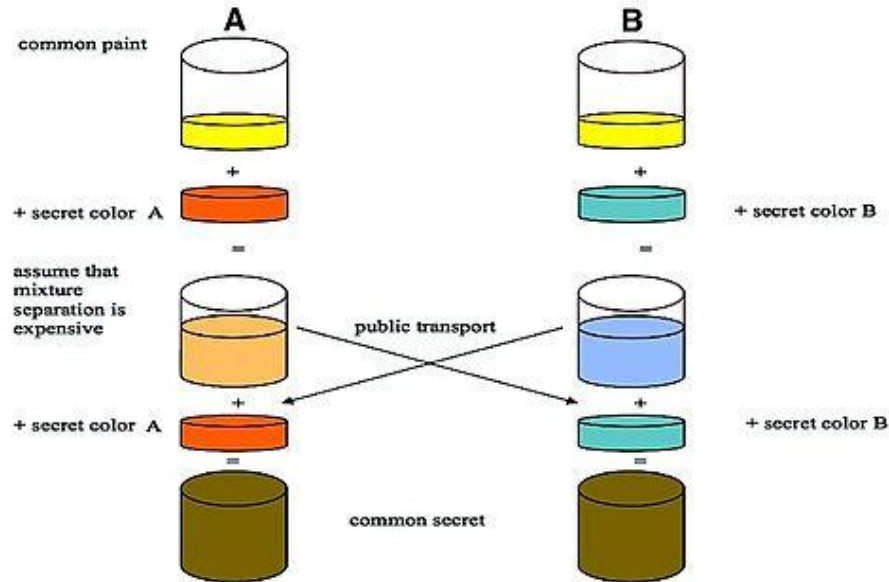
- Foi o último algoritmo aprovado pelo FIPS (*Federal Information Processing Standards*)
- Resultado de uma seleção de diversos algoritmos
- Aprovado em 2001
- Trabalha com blocos de 128 bits
- Capaz de utilizar chaves criptográficas de 128, 192 e 256 bits

Algoritmo Diffie-Hellman de troca de chaves simétricas

- Permite a troca de chaves em um canal inseguro sem nenhum conhecimento prévio de qualquer segredo
 - <http://www.rsasecurity.com/rsalabs/node.asp?id=2248>

Algoritmo Diffie-Hellman de troca de chaves simétricas

- Permite a troca de chaves simétricas em um canal inseguro sem nenhum conhecimento prévio de qualquer segredo



5.3.2 - Criptografia assimétrica

- Pode usar o mesmo algoritmo ou algoritmos diferentes para cifrar e decifrar a informação
- Utiliza duas chaves distintas para cifrar e decifrar
 - **Chave Pública:** distribuída livremente
 - **Chave Privada:** pertence apenas ao dono do par de chaves
- O par de chaves possui propriedades importantes:
 - Uma mensagem cifrada com a chave pública só pode ser decifrada com a chave privada
 - Uma mensagem cifrada com a chave privada só pode ser decifrada com a chave pública
 - Derivar a chave privada a partir da chave pública é computacionalmente inviável

- Duas pessoas (Alice e Bob) se comunicando usando criptografia assimétrica:
 - 1. Alice e Bob, cada um deles cria seu próprio par de chaves (pública e privada)
 - 2. Alice e Bob trocam sua chaves públicas
 - 3. Alice escreve uma mensagem para Bob e usa a chave pública de Bob para cifrar a mensagem. Alice envia o resultado para Bob
 - 4. Bob usa a sua chave privada para decifrar a mensagem
 - 5. Bob escreve uma resposta, cifra com a chave pública de Alice e envia para Alice
 - 6. Alice usa a sua chave privada para decifrar a resposta
- **Dúvida:** como garantir que a chave pública de Alice realmente pertence a Alice, e não a uma pessoa se fazendo passar por Alice?
 - Qualquer pessoa poderia gerar um par de chaves como se fosse Alice e distribuir uma chave pública falsa

➤ Solução?

- necessário um mecanismo para atestar a autenticidade de uma chave pública, chamado de ***certificação digital***

➤ Algoritmo mais conhecido de chave pública é o RSA, que se tornou público em 6 de setembro de 2000

➤ Maiores informações sobre o RSA pode ser obtidas no padrão PKCS #1 (*Public Key Cryptography Standard #1*), encontrado em:

- <https://tools.ietf.org/html/rfc8017>

5.3.3 - Funções *hash*

- É uma função especial que, a partir de uma entrada de tamanho arbitrário, produz uma saída de tamanho fixo
- A saída é normalmente chamada de *hash* ou *digest* da mensagem original
- Um algoritmo adequado para uma função *hash* deve possuir as seguintes propriedades:
 - **1. Consistente:** a mesma entrada deve gerar sempre a mesma saída (???)
 - **2. Randômico:** gerar uma saída que não permita descobrir informações sobre a mensagem original

- **3. Único:** deve ser quase impossível que duas mensagens diferentes produzam o mesmo *hash*
 - quando isso ocorre dizemos que houve “**colisão**”
 - em algoritmos de *hash* usados em criptografia, uma “**colisão**” pode indicar fraqueza no algoritmo
- **4. One way:** a partir da saída, deve ser quase impossível descobrir a mensagem original

- Para que serve?
- Uma função *hash* gera uma representação de uma mensagem ou arquivo
- Análogo à impressão digital humana => teoricamente único
- “Representa” a mensagem original em um espaço de armazenamento menor
- Usado para garantir a integridade de uma mensagem

- Duas pessoas (Alice e Bob) se comunicando usando *hash*:
 - 1. Alice escreve uma mensagem. Após a mensagem pronta, um *hash* é calculado para representar unicamente a mensagem
 - 2. A mensagem original é enviada para Bob junto com o hash
 - 3. Bob pega a mensagem original e calcula um novo *hash* da mensagem
 - 4. Caso os dois *hashes* sejam iguais, a mensagem não foi alterada
- Um usuário malicioso pode mudar a mensagem e o *hash*, tornando a nova mensagem “válida”
- Para garantir a confiabilidade das funções *hash* como assinaturas, elas devem ser combinadas com a criptografia pública

➤ Algoritmos mais comuns de *hash*: MD5 e SHA

➤ **MD5:**

- processa entrada em blocos de 512 bits e produz uma saída de 128 bits

➤ **SHA:**

- processa entrada em blocos de 512 bits e produz uma saída de 160 bits
- processamento mais intensivo que o MD5
- mais lento que o MD5
- SHA-1: atualização por questões de segurança
- SHA-2: variações do SHA → SHA-224, SHA-256, SHA-384 e SHA-512

➤ Pesquisadores chineses anunciaram, em 2004, uma série de colisões no MD5

- <http://eprint.iacr.org/2004/199.pdf>
- <http://eprint.iacr.org/2004/146.ps>

- Ainda não há nenhuma colisão conhecida no algoritmo SHA-1
- Através de um ataque de colisão, um *hacker* poderia substituir uma mensagem por outra, desde que elas tenham o mesmo *hash* resultante
- Como o *hacker* não pode escolher uma mensagem arbitrária, este tipo de ataque é difícil de ser realizado, apesar de não ser impossível
- Um típico ataque bem sucedido poderia ser a substituição de um valor de transferência bancária por um outro de valor mais alto, mas que produziria o mesmo *hash*

5.4 - Assinaturas digitais

- Por meio de uma assinatura digital, é possível atestar a identidade do signatário de um documento (***autenticação***) e garantir que um determinado documento não foi alterado (***integridade***)
- Assinatura digital necessita de criptografia assimétrica e funções *hash*
- Os algoritmos de assinatura digital mais comuns são: RSA e o DSS
- Assinatura digital não garante ***confidencialidade***
- Pode ser combinada com um algoritmo de criptografia para garantir a confidencialidade
- Assinaturas digitais sofrem do mesmo problema de autenticidade das chaves públicas

➤ Duas pessoas (Alice e Bob) se comunicando usando assinaturas digitais:

- 1. Alice cria um par de chaves
- 2. Alice envia sua chave pública para Bob
- 3. Alice escreve uma mensagem para Bob e usa a mensagem como entrada para uma função *hash*, que produzirá uma saída de tamanho fixo (*message digest*)
- 4. Alice cifra a *message digest* com sua chave privada, resultando na assinatura digital
- 5. Alice envia a mensagem original com a assinatura digital para Bob
- 6. Bob utiliza a chave pública de Alice para decifrar a assinatura, recuperando a *message digest*
- 7. Bob calcula a *message digest* da mensagem recebida, usando a mesma função usada por Alice
- 8. Caso os dois *hashes* (*message digest*) sejam iguais, a mensagem foi enviada por uma pessoa com a chave privada de Alice e não foi modificada na transmissão

5.5 - Certificação digital

- Um certificado digital consiste em uma mensagem assinada digitalmente, usada para atestar a validade de uma chave pública
- Certificados digitais normalmente seguem o padrão X.509 do ITU-T
 - Versão do X.509
 - Número serial do certificado
 - Informação de algoritmos do gerador do certificado
 - Identificação do gerador do certificado
 - Datas de validade
 - Informação sobre o algoritmo assimétrico do dono do certificado
 - Assinatura digital da autoridade geradora do certificado

- Um certificado deve ser assinado por uma entidade certificadora (*Certification Authorities* - **CA**) para ser considerado válido
- CA's são entidades confiáveis que emitem e atestam certificados
 - análogos a cartórios que verifica assinaturas normais
- A chave pública da CA deve ser amplamente distribuída
 - e.g.: *browsers* já trazem essas chaves pré-instaladas
- Uma CA é responsável por criar, distribuir e invalidar certificados
 - invalidação de certificados é feita através de listas especiais chamadas de **CRL** (*Certificate Revocation Lists*)
- **PKI** (*Public Key Infrastructure*) ou **ICP** (*Infra-estrutura de Chaves Públicas*)
 - conjunto de hardware e software, pessoal, políticas e procedimento para se criar uma infra-estrutura de certificação digital
 - Governo Federal Brasileiro possui o ICP Brasil

5.6 - Exemplo completo

- 1. Alice e Bob geram seus respectivos pares de chaves
- 2. Alice e Bob entram em contato com uma CA para obter seus certificados. A CA, após certificar a identidade de cada um, gera um certificado assinado com a chave privada da CA
- 3. Alice e Bob trocam certificados (ou solicitam da CA). Verificam a autenticidade com a chave pública da CA (amplamente divulgada) e passam a confiar nas respectivas chaves públicas
- 4. Alice prepara uma chave simétrica randômica e calcula o seu *hash* utilizando uma função conhecida por Bob. Alice cifra o *hash* resultante com sua chave privada, formando uma assinatura digital

- **5.** Alice cifra a chave simétrica + assinatura, utilizando a chave pública de Bob, e transmite o conjunto resultante para Bob
- **6.** Bob, utilizando sua chave privada, decifra o conjunto chave simétrica + assinatura
- **7.** Utilizando a chave pública de Alice, Bob decifra a assinatura. Bob calcula o *hash* da chave simétrica utilizando a mesma função de Alice. Caso os dois *hashes* sejam iguais, a chave simétrica foi enviada por Alice e não foi alterada
- **8.** Utilizando a chave simétrica conhecida pelas duas partes, Alice e Bob realizam uma conversa cifrada. Para garantir integridade, cada mensagem é cifrada junto com um *hash*