Aula 10 - Funções Hash

Prof. Gabriel Rodrigues Caldas de Aquino

Instituto de Computação
Universidade Federal do Rio de Janeiro
gabrielaquino@ic.ufrj.br

Compilado em:
September 23, 2025

Funções de Hash

- Uma função de hash aceita uma mensagem de tamanho variável M como entrada.
- Produz um valor de tamanho fixo $h = H(M)$.
- O valor h é chamado de **hash** ou **digest**.

Propriedades Desejáveis de Hash

- A saída deve parecer **aleatória** e estar **uniformemente distribuída**.
- Uma pequena mudança em M altera, com alta probabilidade, muitos bits de h.
- Principal objetivo: **integridade de dados**.
- Exemplo: se qualquer bit de M for alterado, o hash $H(M)$ também mudará.

Função de Hash Criptográfica

- Tipo especial de função de hash usada em aplicações de segurança.
- Deve ser **computacionalmente inviável** de quebrar com eficiência maior que força bruta.
- Usada para verificar se os dados foram alterados.

Propriedades de uma Função de Hash Criptográfica

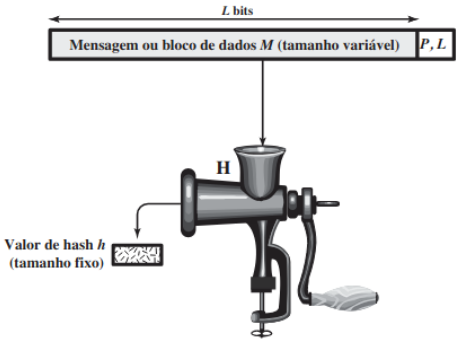
- **Mão única (one-way):** Dado um hash h, é inviável encontrar uma mensagem M tal que $H(M) = h$.
- **Livre de colisão (collision-free):** É inviável encontrar duas mensagens M_1 e M_2 tais que $H(M_1) = H(M_2)$.

Preenchimento em Funções de Hash

- Funções de hash processam mensagens em blocos de tamanho fixo.
- Quando a mensagem não é múltiplo do tamanho do bloco, adiciona-se **preenchimento** (padding).
  - Mensagem preenchida até se tornar um múltiplo de um tamanho fixo (ex: 1024 bits).
- O preenchimento inclui o **tamanho original da mensagem** em bits.
  - **Objetivo:** dificultar que um atacante crie uma mensagem alternativa com o mesmo hash.
- Garante que cada mensagem de tamanho diferente resulte em um hash único e seguro.

Preenchimento em Funções de Hash

Figura 11.1 Função de hash criptográfica; $h = \mathrm{H}(M)$.



P, L = preenchimento mais campo de tamanho

Aplicações de Funções de Hash Criptográficas

Uso do Hash:

- Ela é usada em diversas aplicações de segurança e protocolos da Internet.
- Talvez o hash seja o algoritmo criptográfico mais versátil.

Uso onde a Hash é empregada:

- Autenticação de mensagem
- Assinaturas digitais
- Arquivo de senha de mão única
- Detecção de intrusão e detecção de vírus
- Função pseudoaleatória (PRF)
- Gerador de número pseudoaleatório (PRNG)

Autenticação de Mensagem

- Autenticação de mensagem é um mecanismo usado para verificar a integridade de uma mensagem
- Garante que os dados recebidos estão exatamente como foram enviados, sem modificação, inserção, exclusão ou repetição.
- Em muitos casos, também é exigido que a identidade declarada do emissor seja validada.
- Em muitas aplicações, o valor gerado pelo Hash é chamado de **resumo de mensagem** (ou *digest*, em inglês).

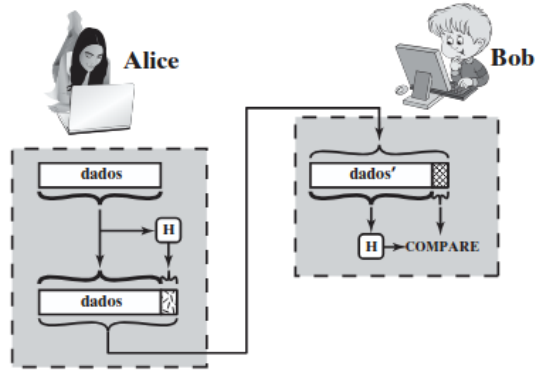
Autenticação de mensagem

A essência do uso de uma função de hash para autenticação de mensagem é a seguinte:

1. O emissor calcula um valor de hash como função dos bits da mensagem.
2. O emissor transmite a mensagem junto com o valor de hash.
3. O receptor recalcula o valor de hash sobre a mensagem recebida.
4. O receptor compara o valor calculado com o valor recebido.

Se houver divergência, o receptor sabe que a mensagem (ou o valor de hash) foi alterada.

Autenticação básica



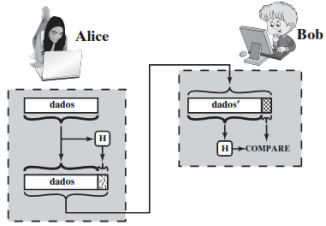
(a) Uso da função de hash para verificar integridade de dados

Pergunta

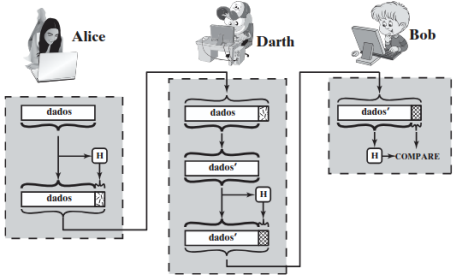
Qual o problema neste cenário?

Autenticação básica - Problema

Figura 11.2 Ataque contra função de hash.



(a) Uso da função de hash para verificar integridade de dados



(b) Ataque *man-in-the-middle*

Proteção do valor de hash

A função de hash precisa ser **transmitida de forma segura**.

- Se um adversário **alterar ou substituir** a mensagem, não deve ser viável alterar também o valor de hash para enganar o receptor.
- Exemplo de ataque:
  1. Alice transmite dados com o hash
  2. Darth intercepta, altera a mensagem e calcula um novo hash
  3. Bob recebe sem perceber a modificação.
- Para impedir esse ataque, **o valor de hash gerado por Alice precisa ser protegido**.

Pergunta

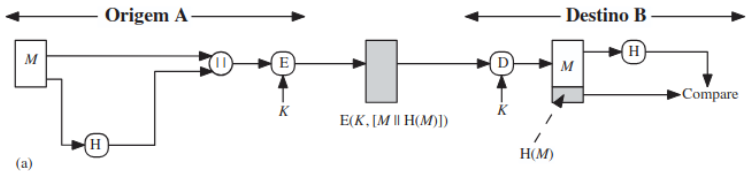
Como podemos proteger o Hash nesse cenário?

Métodos de proteção da Hash

- Método A: Autenticação com hash + cifragem simétrica
- Método B: Cifrando o hash com cifragem simétrica
- Método C: Mensagem com Hash e Valor Secreto
- Método D: Mensagem com Hash mais Valor Secreto com confidencialidade

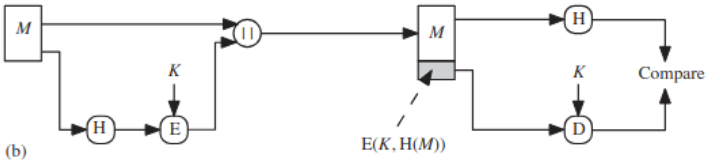
Método A: Autenticação com hash + cifragem simétrica

- Mensagem mais o código de hash concatenado **são encriptados** usando a encriptação simétrica.
- Como somente A e B compartilham a chave secreta, a mensagem deverá ter vindo de A e sem alteração.
- O código de hash oferece a estrutura ou redundância exigida para conseguir a autenticação.
- Como a encriptação é aplicada à mensagem inteira mais o código de hash, a confidencialidade também é fornecida.



Método B: Cifrando o hash com cifragem simétrica

- Somente o código de hash é encriptado, usando a encriptação simétrica.
- Isso reduz o peso do processamento para as **aplicações que não exigem confidencialidade**.



Pergunta

Qual o motivo de passar a mensagem em texto plano?

Vantagens do Uso de Hash mas sem a cifragem da mensagem

- Quando a **confidencialidade não é exigida**:
  - usar apenas hash (método com valor secreto) requer menos cálculos que cifrar a mensagem inteira.
  - O software de encriptação é relativamente lento, especialmente com fluxo constante de mensagens.
  - Custos de hardware de encriptação podem ser altos; chips de baixo custo existem, mas cada nó precisa ter capacidade.

Exemplo desse cenário

Baixando a .iso do Linux Mint e verificando com GPG

O que o GPG faz com esses dois arquivos?

Comando:

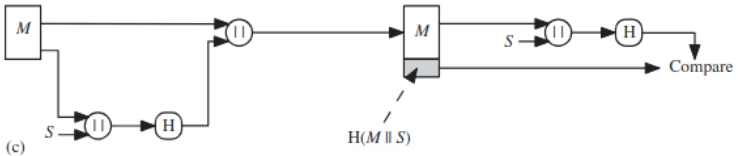
```
gpg --verify sha256sum.txt.gpg sha256sum.txt
```

Etapas realizadas pelo GPG:

1. Lê a assinatura digital contida em `sha256sum.txt.gpg`.
2. Calcula o hash real do conteúdo atual de `sha256sum.txt`.
3. Compara o hash calculado com o hash assinado.
   - Se forem **iguais**: a assinatura é válida (`Good signature`).
   - Se forem **diferentes**: a assinatura falha (`BAD signature`).

Método C: Mensagem com Hash e Valor Secreto

- Usar apenas uma função de hash, sem cifragem, para autenticação de mensagem.
- Ambas as partes compartilham um valor secreto comum: S.
- Funcionamento:
  1. Emissor (A) calcula o hash sobre a concatenação da mensagem e do segredo: $H(M \,\|\, S)$.
  2. O valor de hash resultante é anexado à mensagem e enviado a B.
  3. Receptor (B), possuindo S, recalcula o hash para verificar a integridade e autenticidade.
- Como S não é enviado, um adversário não consegue modificar a mensagem nem gerar mensagens falsas.



Código de Autenticação de Mensagem (MAC)

Método C é a base do HMAC - Hash Based Message Authentication Code

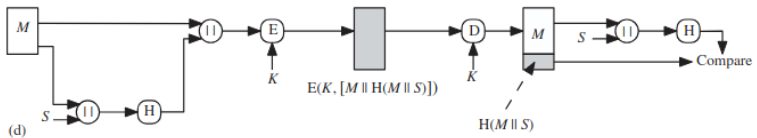
- A autenticação de mensagem normalmente é alcançada usando um **MAC** (Message Authentication Code), também chamado de função de hash chaveada.
- MACs são usados entre duas partes que compartilham uma **chave secreta** para autenticar informações trocadas.
- A função MAC recebe como entrada a chave secreta e um bloco de dados, produzindo um valor de hash (**MAC**) associado à mensagem.

Código de Autenticação de Mensagem (MAC)

- Para verificar integridade, aplica-se novamente a função MAC sobre a mensagem e compara-se com o MAC recebido.
- Um invasor que altere a mensagem não poderá gerar o MAC correto sem conhecer a chave secreta.
- A verificação também garante autenticidade: apenas a parte que conhece a chave secreta pode ter gerado o MAC.

Método D: Mensagem com Hash mais Valor Secreto com confidencialidade

- A **confidencialidade** pode ser acrescentada à abordagem do método anterior encriptando a mensagem inteira mais o código de hash

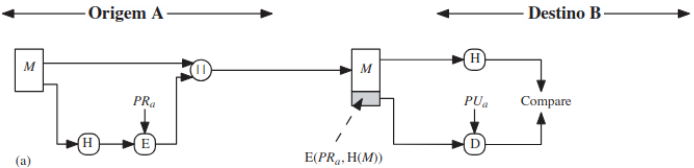


Cenário

Esse cenário mostra exatamente um canal criptografado com a autenticacao da mensagem, igual na VPN!

Assinaturas Digitais

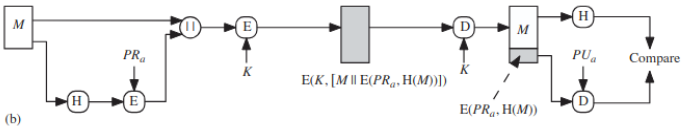
- **Usa Chave pública e privada**
- Assinatura digital é uma aplicação importante, similar à autenticação de mensagem.
- O valor de hash da mensagem é encriptado com a **chave privada** do usuário.
- Qualquer pessoa que conheça a **chave pública** do usuário pode verificar a integridade da mensagem associada à assinatura.
- Um invasor que tente alterar a mensagem precisaria conhecer a chave privada do usuário.



Esse caso é exatamente o caso do hash da iso do Linux Mint!

Assinaturas Digitais com Confidencialidade

- Se, além da assinatura digital, o que se procura é confidencialidade, então a mensagem mais o código hash encriptado com a chave privada pode ser encriptado usando uma chave secreta simétrica. Essa é uma técnica comum.



Arquivos de Senha de Mão Única

- Funções de hash são usadas para criar arquivos de senha de **mão única**.
  - No linux usa-se o /etc/shadow
- Em vez de armazenar a senha real, o sistema operacional armazena o **hash da senha**.
- Assim, mesmo que um hacker acesse o arquivo, a senha real não pode ser recuperada.
- Processo de autenticação:
  1. O usuário fornece a senha
  2. O sistema compara o **hash informado** com o hash armazenado.
- Este método é amplamente usado na maioria dos sistemas operacionais.

Detecção de Intrusão e Vírus com Hash

- Funções de hash podem ser usadas para **detecção de intrusão** e **detecção de vírus**.
- Armazene $H(F)$ para cada arquivo em um sistema e guarde os valores de hash de forma segura.
- Posteriormente, verifique se um arquivo foi modificado recalculando $H(F)$.
- Um intruso precisaria alterar F sem alterar $H(F)$ para evitar detecção, o que é computacionalmente inviável.

Trabalho interessante:

- Documentação Labrador
- Código Labrador

Além disso, Hashes são usadas em função pseudoaleatória (PRF) ou gerador de número pseudoaleatório (PRNG)

Funções de Hash Simples

- Para entender considerações de segurança, apresentamos funções de hash simples e **não seguras**.
- Todas as funções de hash operam sobre blocos de n bits da entrada (mensagem, arquivo etc.).
- A entrada é processada bloco a bloco em um padrão iterativo para produzir um hash de n bits.
- Um exemplo simples: o **XOR bit a bit** de cada bloco.

$$C_i = b_{i1} \oplus b_{i2} \oplus \ldots \oplus b_{im}$$

onde

$C_i = i$-ésimo bit do código de hash, $1 \leq i \leq$ n

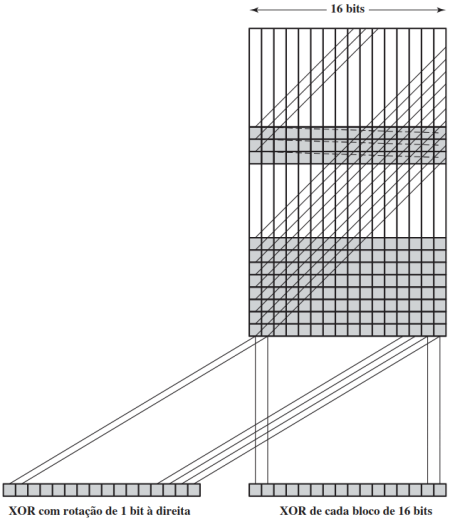
$m =$ número de blocos de n bits na entrada

$b_{ij} = i$-ésimo bit no j-ésimo bloco

$\oplus =$ operação XOR

Esquema de Hash simples com XOR

Figura 11.5 Duas funções de hash simples.



Limitações do XOR em Funções de Hash

- XOR simples não é suficiente quando apenas o código de hash é encriptado.
- Problema: blocos de texto cifrado podem ser **reordenados** sem alterar o valor do hash.
- Isso permite que um atacante modifique a mensagem sem que a integridade seja detectada.
- Conclusão: para garantir a integridade, precisamos de funções de hash criptográficas **não lineares e resistentes a colisões**.

Pré-imagem e Colisões em Funções de Hash

- Para um valor de hash $h = H(x)$, x é chamado de **pré-imagem** de h.
- Isso significa que x é um bloco de dados cuja função hash produz h.
- Funções hash são **mapas muitos-para-um**: para qualquer valor h, podem existir várias pré-imagens.
- Uma **colisão** ocorre se existirem $x \neq y$ tal que $H(x) = H(y)$.
- Colisões são indesejáveis quando funções de hash são usadas para **integridade de dados**.

Pré-imagens e Potenciais Colisões

- Suponha uma função de hash H com saída de n bits e entrada de b bits ($b > n$).
- Total de mensagens possíveis: 2^b.
- Total de valores de hash possíveis: 2^n.
- Em média, cada valor de hash corresponde a 2^{b-n} pré-imagens.
- Se H distribui uniformemente os valores de hash, cada hash terá aproximadamente 2^{b-n} pré-imagens.
- Para entradas de tamanho variável, a variação de pré-imagens por valor de hash aumenta.
- Apesar disso, os riscos de segurança não são tão graves; é necessário definir requisitos precisos de segurança para funções de hash criptográficas.

Requisitos de Funções de Hash

Tabela 11.1 Requisitos para função de hash criptográfica H.

Requisito	Descrição
Tamanho de entrada variável	H pode ser aplicado em um bloco de dados de qualquer tamanho.
Tamanho da saída fixo	H produz uma saída de tamanho fixo.
Eficiência	$H(x)$ é relativamente fácil de calcular para qualquer valor de x informado, através de implementações tanto em hardware quanto em software.
Resistência à pré-imagem (propriedade de mão única)	Para qualquer valor de hash h informado, é computacionalmente impossível encontrar y, de modo que $H(y) = h$.
Resistência à segunda pré-imagem (resistência à colisão fraca)	Para qualquer bloco x informado, é computacionalmente impossível encontrar $y \neq x$ com $H(y) = H(x)$.
Resistência à colisão forte	É computacionalmente impossível encontrar qualquer par (x, y), de modo que $H(x) = H(y)$.
Pseudoaleatoriedade	A saída de H atende os testes padrão de pseudoaleatoriedade.

As primeiras três propriedades são requisitos para a aplicação prática de uma função de hash.

Resistência à Pré-imagem (Propriedade de Mão Única)

- A resistência à pré-imagem significa que é fácil gerar o código de hash a partir da mensagem.
- Porém, é praticamente impossível gerar a mensagem a partir do código de hash.
- Essencial quando a autenticação envolve um valor secreto que não é transmitido.
- Se a função de hash não tiver esta propriedade, um invasor pode:
  - Observar a mensagem M e o hash $h = H(S||M)$.
  - Inverter a função de hash para obter $S||M = H^{-1}(h)$.
  - Recuperar o valor secreto S facilmente.
- Portanto, a resistência à pré-imagem é crucial para proteger valores secretos.

Resistência à Segunda Pré-imagem

- Garante que é impossível encontrar uma mensagem alternativa com o mesmo valor de hash de uma mensagem específica.
- Importante para prevenção contra falsificação quando se usa um hash encriptado.
- Se a função de hash não possuir essa propriedade, um invasor poderia:
  - Observar ou interceptar uma mensagem com seu hash encriptado.
  - Decriptar o hash da mensagem original.
  - Criar uma nova mensagem diferente com o mesmo hash.
- Portanto, esta propriedade protege contra ataques de falsificação.

Funções Hash Fraca e Forte

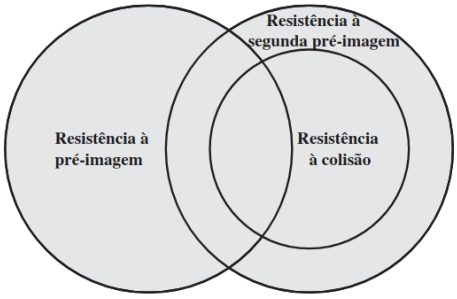
- Uma função de hash que satisfaz as primeiras cinco propriedades é chamada de **função hash fraca**.
- Se a função também satisfaz a sexta propriedade, **resistência à colisão**, é chamada de **função hash forte**.
- Função hash forte protege contra ataques onde terceiros tentam gerar mensagens diferentes com o mesmo hash.
- Exemplo de ataque sem resistência à colisão:
  - Bob cria duas mensagens diferentes com o mesmo hash (m1 e m2).
  - Alice assina a mensagem m1.
  - Bob usa o hash da mensagem m1 para reivindicar que a mensagem m2 foi assinada.
- Portanto, a resistência à colisão é crucial para evitar falsificação de assinaturas.

Pseudoaleatoriedade em Funções de Hash Criptográficas

- A pseudoaleatoriedade não é tradicionalmente citada como requisito formal, mas é implicitamente importante.
- Funções de hash criptográficas são frequentemente usadas para:
  - Derivação de chaves.
  - Geração de números pseudoaleatórios (PRNG/PRF).
- Nas aplicações de integridade de mensagens, as propriedades de resistência dependem de a saída parecer aleatória.
- Portanto, é apropriado considerar que uma função de hash produz uma saída pseudoaleatória.

Relação entre propriedades de Funções de Hash

Figura 11.6 Relação entre as propriedades das funções de hash.



- Uma função que é resistente à colisão também é resistente à segunda pré-imagem, mas o inverso não é necessariamente verdadeiro.
- Uma função pode ser resistente à colisão, mas não ser resistente à pré-imagem, e vice-versa. Uma função pode ser resistente à pré-imagem, mas não ser resistente à segunda pré-imagem e vice-versa.

Propriedades de resistência Funções de Hash e seu uso

Tabela 11.2 Propriedades de resistência necessárias para várias aplicações de integridade de dados.

	Resistência à pré-imagem	Resistência à segunda pré-imagem	Resistência à colisão
Hash + assinatura digital	sim	sim	sim*
Detecção de intrusão e detecção de vírus		sim	
Hash + encriptação simétrica			
Arquivo de senha de mão única	sim		
MAC	sim	sim	sim*

*Resistência necessária se o invasor é capaz de elaborar um determinado ataque de mensagem

Ataques de Força Bruta em Funções de Hash

- Ataques de força bruta não dependem do algoritmo de hash, apenas do tamanho do valor de hash em bits.
- Consiste em tentar todas as combinações possíveis até encontrar uma pré-imagem ou colisão.
- O esforço necessário cresce exponencialmente com o tamanho do hash: para um hash de n bits, há 2^n possíveis valores.
- Diferente da criptoanálise, que explora vulnerabilidades específicas do algoritmo.
- Exemplo: para um hash de 128 bits, seriam necessárias 2^{128} tentativas em média para encontrar uma colisão por força bruta.

Ataques de Pré-imagem e Segunda Pré-imagem

Cenário: O atacante conhece uma saída da Hash

- O adversário busca um valor y tal que $H(y) = h$, onde h é um hash conhecido.
- Método de força bruta: testar valores aleatórios de y até encontrar uma correspondência.
- Para um hash de m bits, o esforço médio necessário é 2^{m-1} tentativas.
- Esse ataque explora a dificuldade de inverter a função de hash (resistência à pré-imagem).

Ataques Resistentes à Colisão

Cenário: O atacante busca desobrir pares de saída da Hash

- O adversário busca duas mensagens x e y tal que $H(x) = H(y)$.
- Esse ataque exige **menos esforço** do que um ataque de pré-imagem ou segunda pré-imagem.
- Baseado no **paradoxo do aniversário**: a probabilidade de colisão aumenta rapidamente com o número de tentativas.
- Para um hash de m bits, o esforço médio para encontrar uma colisão é aproximadamente $2^{m/2}$ tentativas.

Ataque de Colisão Explorado via Paradoxo do Aniversário

Estratégia para explorar o paradoxo do dia do aniversário:

- Preparação da origem A: mensagem legítima x é criada
- Oponente gera $2^{m/2}$ variações x' de x com mesmo significado e armazena os hashes.
- Oponente prepara uma mensagem fraudulenta y para a qual deseja a assinatura.
- Pequenas variações y' de y são geradas; o oponente calcula $H(y')$ e verifica correspondência com algum $H(x')$.
- Quando há correspondência, a variação válida de A é usada para assinatura, que é então aplicada à variação fraudulenta y'.

Ambas produzem a mesma assinatura.

Exemplo de Ataque de Colisão com Hash de 64 bits

- Com um hash de 64 bits, o esforço necessário é da ordem de 2^{32}.
- Criação de variações que mantêm o mesmo significado não é difícil.
- Exemplos de variações:
  - Inserção de pares de caracteres “espaço-espaço-retrocesso” entre palavras.
  - Substituição de “espaço-retrocesso-espaço” em posições selecionadas.
  - Reescrita da mensagem mantendo o significado original.

Resumo do esforço exigido

Resumo: Para um código de hash de tamanho m, o nível de esforço exigido, conforme vimos, é proporcional ao seguinte:

Resistência à pré-imagem	2^m
Resistência à segunda pré-imagem	2^m
Resistência à colisão	$2^{m/2}$

Resistência a Colisões em Hashes

- A resistência à colisão é desejável em códigos de hash seguros.
- Para um hash de m bits, a força contra ataques por força bruta é aproximadamente $2^{m/2}$.
- Van Oorschot e Wiener [VANO94] projetaram uma máquina de US$10 milhões para MD5 (128 bits):
  - Capaz de encontrar uma colisão em 24 dias.
  - Mostra que 128 bits é inadequado para segurança moderna.
- Hashes de 160 bits (como SHA-1) aumentam a resistência:
  - Mesma máquina levaria mais de 4.000 anos para encontrar uma colisão.
  - Contudo, com tecnologia atual, 160 bits começa a ficar suspeito.

Criptoanálise de Funções de Hash e MACs

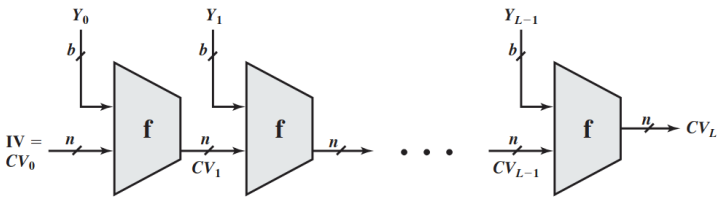
- Assim como em algoritmos de criptografia, ataques criptoanalíticos em **hashes** e **MACs** buscam explorar propriedades do algoritmo para superar a simples busca exaustiva.
- A resistência de um hash ou MAC à criptoanálise é medida comparando-se seu esforço com o esforço de um ataque por força bruta.
- Um hash ou MAC ideal exigirá **esforço criptoanalítico maior ou igual ao esforço por força bruta**.

Estrutura Iterativa de Funções de Hash

- A estrutura iterativa de hash foi proposta por Merkle [MERK79, MERK89] e é usada na maioria das funções de hash atuais, incluindo SHA.
- Funcionamento geral:
  - A mensagem de entrada é dividida em L blocos de tamanho fixo b bits.
  - Se necessário, o bloco final é preenchido para completar b bits e inclui o tamanho total da mensagem.
  - Incluir o tamanho dificulta ataques, pois o oponente deve encontrar colisões com mensagens do mesmo ou de tamanhos diferentes que levem ao mesmo hash.
- O algoritmo usa repetidamente uma **função de compactação** f:
  - Recebe duas entradas: a **variável de encadeamento** (n bits da etapa anterior) e o bloco atual (b bits). Normalmente, b $>$ n;
  - Produz uma saída de n bits.
  - A variável de encadeamento inicial é definida pelo algoritmo e o valor final dela é o **hash resultante**.

Estrutura geral de hash seguro

Figura 11.8 Estrutura geral do código de hash seguro.



IV = valor inicial
CV_i = variável de encadeamento
Y_i = i-ésimo bloco de entrada
f = algoritmo de compactação
L = Número de blocos de entrada
n = Tamanho do código de hash
b = Tamanho do bloco de entrada

Estrutura geral de hash seguro

A função de hash pode ser resumida da seguinte forma:

$$CV_0 = IV = \text{valor inicial de } n \text{ bits}$$
$$CV_i = \mathrm{f}(CV_{i-1}, Y_{i-1}) 1 \leq i \leq L$$
$$\mathrm{H}(M) = CV_L$$

onde a entrada da função de hash é uma mensagem M consistindo nos blocos Y0, Y1, ..., YL-1

Motivação e Criptoanálise de Funções de Hash

- Motivação da estrutura iterativa (Merkle [MERK89], Damgård [DAMG89]):
  - Se a função de compactação f for à prova de colisão, a função de hash iterativa resultante também será.
  - Permite criar hashes seguros para mensagens de qualquer tamanho.
  - O design seguro de uma função de hash se reduz ao design de uma função de compactação segura para blocos de tamanho fixo.
- Criptoanálise de funções de hash:
  - Foca na estrutura interna de f.
  - Ataques procuram produzir colisões eficientes para uma única execução de f, considerando o valor fixo do IV.
  - Normalmente, f consiste em várias rodadas, e o ataque analisa padrões de mudança de bits entre rodadas.

Colisões em Funções de Hash

- **Importante**: Para qualquer função de hash, **colisões sempre existem**:
  - Mensagens têm tamanho $\geq 2b$ (devido ao campo de tamanho)
  - Hashes têm tamanho fixo n, com $b > n$
- O objetivo de uma função de hash segura não é eliminar colisões (isso é impossível), mas torná-las **computacionalmente inviáveis de encontrar**.
- Assim, a segurança é definida pelo **esforço necessário para descobrir uma colisão**, não pela sua inexistência.

Secure Hash Algorithm (SHA)

- O **SHA** é a função de hash mais utilizada nos últimos anos.
- Em 2005, era praticamente o último algoritmo de hash padronizado restante após vulnerabilidades em outros algoritmos.
- Desenvolvido pelo **NIST** e publicado como padrão federal (**FIPS 180**) em 1993.
- Primeira versão (**SHA-0**) apresentou vulnerabilidades criptoanalíticas.
- Revisão lançada em 1995 (**FIPS 180-1**), conhecida como **SHA-1**.
- Baseado na função de hash **MD4**, seguindo de perto seu projeto.

SHA-1 e SHA-2

- **SHA-1** produz um hash de 160 bits.
- Em 2002, o **NIST** revisou o padrão (**FIPS 180-2**), definindo três novas versões:
  - SHA-256 (256 bits)
  - SHA-384 (384 bits)
  - SHA-512 (512 bits)
- Coletivamente, estas versões são conhecidas como **SHA-2**.
- Mantêm a mesma estrutura básica do SHA-1, usando aritmética modular e operações binárias lógicas.
- Em 2008, o **FIPS PUB 180-3** adicionou uma versão de 224 bits (SHA-224).
- SHA-1 e SHA-2 também são especificados no **RFC 6234**, que inclui implementação em C.

Descontinuação do SHA-1

- Em 2005, o **NIST** anunciou a intenção de retirar a aprovação do SHA-1 e adotar o SHA-2 por volta de 2010.
- Uma equipe de pesquisa demonstrou um ataque que poderia gerar duas mensagens diferentes com o mesmo hash SHA-1 usando 2^{69} operações.
- Este número é significativamente menor que as 2^{80} operações anteriormente estimadas para encontrar uma colisão.
- O resultado acelerou a necessidade de transição para SHA-2.
- Referência: Wang et al. [WANG05].

Tabela SHA

Tabela 11.3 Comparação de parâmetros do SHA.

	SHA-1	SHA-224	SHA-256	SHA-384	SHA-512
Tamanho do resumo da mensagem	160	224	256	384	512
Tamanho da mensagem	$< 2^{64}$	$< 2^{64}$	$< 2^{64}$	$< 2^{128}$	$< 2^{128}$
Tamanho do bloco	512	512	512	1024	1024
Tamanho da word	32	32	32	64	64
Número de etapas	80	64	64	80	80

Nota: todos os tamanhos são medidos em bits.

SHA-512: Etapa 1 - Preenchimento

- Entrada: mensagem com tamanho menor que 2^{128} bits.
- Saída: resumo (hash) de 512 bits.
- Processamento em blocos de 1024 bits.
- **Etapa 1 - Preenchimento:**
  - A mensagem é preenchida para que o tamanho seja congruente a 896 módulo 1024.
  - O preenchimento é sempre aplicado, mesmo se a mensagem já tiver o tamanho desejado.
  - Número de bits de preenchimento: entre 1 e 1024.
  - Estrutura do preenchimento: um bit 1 seguido pelos bits 0 necessários.

SHA-512: Etapa de Anexar Tamanho

- **Etapa 2 - Anexar tamanho:**
  - Um bloco de 128 bits é anexado à mensagem.
  - O bloco contém o tamanho da mensagem original (antes do preenchimento) como um inteiro de 128 bits sem sinal.
  - Ordem dos bytes: byte mais significativo primeiro.
- Após as duas primeiras etapas, a mensagem resultante tem comprimento múltiplo de 1024 bits.
- Mensagem expandida representada como blocos de 1024 bits: $M_1, M_2, \ldots, M_N$.
- Tamanho total da mensagem expandida: $N \times 1024$ bits.

SHA-512: Inicialização do Buffer de Hash

- Um buffer de 512 bits mantém resultados intermediários e finais.
- Representado por 8 registradores de 64 bits: a, b, c, d, e, f, g, h.
- Inicialização com valores hexadecimais:

```
a = 6A09E667F3BCC908   e = 510E527FADE682D1
b = BB67AE8584CAA73B   f = 9B05688C2B3E6C1F
c = 3C6EF372FE94F82B   g = 1F83D9ABFB41BD6B
d = A54FF53A5F1D36F1   h = 5BE0CD19137E2179
```

- Valores armazenados em **big-endian**.
- Derivados dos primeiros 64 bits das partes fracionárias das raízes quadradas dos oito primeiros números primos.