

# La Sicurezza nei Sistemi Distribuiti

Protezione delle **Risorse** e delle **Informazioni**

**Risorse di**  
**esecuzione**  
**memorizzazione**  
**comunicazione**

Aspetti del problema **Sicurezza**:

*Autenticazione*      *Authentication*  
*Autorizzazione*    *Authorisation*

*Riservatezza*      *Privacy*  
*Disponibilità*      *Availability*  
*Integrità*          *Integrity*  
*Paternità*          *Non-repudiability*

## Autenticazione

Verifica dell'identità dell'utente attraverso:

- Possesso di un oggetto (es., smart card)
- Conoscenza di un segreto (password)
- Caratteristica personale fisiologica  
(impronta digitale, venature retina)

Problema della mutua autenticazione

Autenticazione  $\neq$  Autorizzazione

## Autorizzazione

Specifica le azioni concesse ad ogni utente

## Riservatezza

Previene la lettura non autorizzata delle informazioni.  
(es. un intruso che intercetta un messaggio non è in grado di interpretarlo, di risalire al contenuto informativo del msg)

## Integrità

Previene la modifica non autorizzata delle informazioni  
(es. un messaggio spedito dal mittente è ricevuto tale e quale dal destinatario)

Alcune modifiche dell'informazione possono  
non alterare l'integrità

## Disponibilità

Garantire in qualunque momento la possibilità di usare le risorse

## Paternità

Il mittente non può ripudiare un messaggio

## Esempio

Alice manda un messaggio a Bob dicendogli costruiscimi una casa per 1 miliardo

### Problemi

**Intrusione:** Trudy intercetta il messaggio e cambia 1 miliardo in 100 miliardi (violata l'**integrità** del messaggio)

**Soluzione:** cifra il messaggio, Trudy può intercettare il messaggio ma non lo sa leggere

**Risoluzione controversia** tra i comunicanti: il messaggio è cifrato (**identità** del mittente) *ma* sia Bob che Alice conoscono come cifrare il messaggio e possono mentire, senza che l'altro possa dimostrarlo due casi:

- Alice non ha più i soldi, ma Bob ha costruito la casa
- Bob costruisce una casa di costo 10 miliardi

In un regime di mutuo sospetto nessuno può provare ad una terza parte che l'altro sta mentendo.

**Soluzione:** Alice firma il messaggio, chiunque potrà verificare che Alice ha chiesto una casa da 1 miliardo e che così è scritto nel messaggio

## Attacchi alla sicurezza del sistema

CHI può fare **QUALI** operazioni e su **QUALI** oggetti

### **Tentativi di intrusione** **passivi** **attivi**

#### ***Tentativi passivi***

- leggere informazioni di altri
- eseguire analisi del sistema, del traffico

#### ***Tentativi attivi***

- modifica dell'informazione (es., messaggio, file ...)
- cancellazione dell'informazione (es., messaggio, file ...)
- impersonare un altro utente
- accesso non autorizzato alle risorse
- sistema impossibilitato a fornire i servizi

## **PRINCIPIO di SICUREZZA MINIMO**

***Proteggersi dagli attacchi passivi***

***Accorgersi degli attacchi attivi***

### ***Non si tengono nascoste le strategie di sicurezza***

metodi per accedere impropriamente alle risorse:

**Leaking** acquisizione informazioni senza averne l'autorizzazione (confinare dominio dati)

**Browsing** lettura tutti i pacchetti

**Inferencing** deduzione informazioni dai dati stessi

**Masquerading** fingersi un utente diverso da quello reale

## Criteria per valutare la sicurezza dei sistemi

Varie politiche di protezione dei dati:

- accesso ai dati sulla base dello user id e del gruppo di appartenenza (es. Unix)
- livelli di protezione crescenti associati ai dati, sviluppata principalmente in ambito militare, es. informazioni di tipo: *unclassified, confidential, secret, top secret*

### ***Orange Book***

redatto in ambito militare (U.S.) si concentra sulla riservatezza dei dati e sul mandatory access control (non sull'integrità dei dati)

### ***Red Book (TNI)***

Applica i criteri di sicurezza definiti nell'Orange Book ai sistemi interconnessi in rete

### ***Lavender Book (TDI)***

Applica i criteri di sicurezza definiti nell'Orange Book ai data base management system

*Orange Book, Red Book e Lavender Book costituiscono la "Rainbow" series*

Information Technology Security Evaluation Criteria (**ITSEC**) (Germania, Francia, UK, Olanda) ha redatto un rapporto per valutare la sicurezza dei sistemi diretti a gestire informazioni unclassified

Sforzo congiunto USA, Canada ed Europa per lo sviluppo di un "**Common Criteria**"

Relazione tra standard per Sistemi Aperti e requisiti per la sicurezza (livello implementativo)



## Categoria B: **protezione obbligatoria**

### classe B1:

- etichette di sicurezza attaccate a tutti gli utenti, i processi e le risorse, S.O. controlla i read-up e i write-down
- tutti i dispositivi (stampanti etc.) devono trattare opportunamente le etichette di sicurezza

### classe B2:

- trusted path tra S.O. e utente, presenza cioè di meccanismi per garantire che un utente parli al S.O. (trojan horse)
- processi che cambiano livello di sicurezza notificano utente
- strutturazione del kernel: concentrazione delle funzionalità di sicurezza all'interno di un piccolo "security kernel"
- identificazione dei covert channel e delle loro bande di trasmissione
- strette procedure di controllo nella modifica delle parti del sistema sensibili per la sicurezza

### classe B3:

- controllo accessi per utenti con overrule
- auditing attivo
- secure crashing e restarting

## Categoria A: **modello formale di sicurezza;** **informazioni classificate**

### classe A1:

- stessi requisiti precedenti ma è richiesta la verifica del progetto

## **POSIX.6**

### **POSIX.6:** Protection, Audit and Control Interface Standard

1. per realizzare applicazioni portabili, definisce le **interfacce** necessarie alla gestione delle informazioni di sicurezza.
2. per migliorare i meccanismi di sicurezza del POSIX.1

#### Aree funzionali indirizzate:

- auditing
- discretionary access control
- mandatory access control
- information labels
- privilege

## Discretionary Access Control in POSIX.6

Il proprietario dell'oggetto stabilisce i diritti di accesso:

POSIX.1 adotta il meccanismo dei **permission bit**:

☺ semplice ed economico

### scarsa granularità nel controllo degli accessi (non si possono indirizzare utenti individuali o specifici gruppi)

POSIX.6 adotta le **Access Control List** (ogni oggetto ha una ACL associata che specifica i diritti di accesso sulla risorsa per gruppi e utenti)

POSIX.6 NON specifica come implementare le ACL né la rappresentazione interna delle ACL.

## Mandatory Access Control in POSIX.6

1. La protezione di un oggetto non è decisa dal proprietario dell'oggetto
2. Il sistema assicura e impone la protezione degli oggetti

POSIX.6 usa un labeling mechanism

soggetti = processi

oggetti = file (regular file, directory, device, etc.), processi

Tutti i soggetti e oggetti del sistema hanno una MAC label, in ogni momento (unclassified, confidential, secret, top secret).

Un soggetto senza privilegi non può rendere disponibile una informazione con label L1 ad un soggetto di label L2 se  $L2 < L1$

Restrizioni nell'accesso ai file:

- **Lettura** file consentita se la label del processo lettore è maggiore della label del file (no read-up)
- **Scrittura** di un file consentita se la label del file è MAGGIORE della label del processo (no write-down)

Esempio:

- Un processo Secret non può leggere un file Top Secret
- Un processo Secret non può scrivere su un file con label Confidential

## Privilegi in POSIX.6

Il **meccanismo dei privilegi** controlla i diritti di accesso alle risorse da parte degli utenti e dei gruppi.

Può fornire a specifici utenti la capacità di eseguire operazioni “sensibili” ai fini della sicurezza, sotto certe condizioni e per un tempo limitato.

Esempio

Per eseguire un **backup** del sistema, l'amministratore di sistema deve acquisire il **privilegio di lettura** su tutti i file (**override** delle informazioni di controllo dell'accesso su tutti i file)

Esempio

UNIX **super user** è un meccanismo di overriding dei privilegi di tipo “tutto o niente”

POSIX.6 suggerisce un meccanismo di tipo “**least privilege**”, per permettere un override del minor numero possibile di informazioni di sicurezza per lo svolgimento di un determinato compito.

Caratteristiche di un meccanismo di overriding dei privilegi:

- granularità
- durata temporale
- ereditarietà

## Controllo di accesso di sistema

Modello

- a matrice**
- a reticolo**
- a flusso di informazioni**
- a security kernel**

**Modello a matrice**

controllo solo sintattico sulle azioni dei soggetti sugli oggetti

**Modello a reticolo**

soggetti ed oggetti con classificazione anche commerciale

**Modello a flusso**

analisi del flusso di informazioni tra soggetti di classi diverse

**Modello a kernel**

definizione di un kernel centralizzato per la verifica di protezione

## Sicurezza CLIENTE/SERVITORE

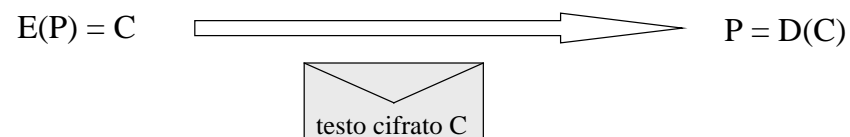
sicurezza sul **canale** con strumenti diversi  
rapporto relazione cliente/servitore basato sul principio del **sospetto reciproco**  
messaggi e autorizzazioni usati **una volta sola** per non avere problemi di ripetizioni da intrusori

politiche di sicurezza		gestione del sistema
controllo d'accesso	crittografia	
autenticazione servitori e clienti		

Vediamo prima il problema della crittografia e poi passiamo all'inserimento di strumenti per un sistema **sicuro**

## CRITTOGRAFIA

la scienza della crittografia fornisce gli strumenti per rendere un messaggio non intelligibile per chiunque non ne sia il destinatario



E = funzione di cifratura

D = funzione di decifrazione

P = plaintext, testo in chiaro

C = ciphertext, testo cifrato

## CRITTOGRAFIA di sostituzione di trasposizione



## Codici di sostituzione (monoalfabetica)

una permutazione sull'alfabeto del **testo chiaro**

*se ogni simbolo corrisponde a un byte*

*alfabeto di 256 simboli ==>*

ogni **simbolo** si trasforma in un altro simbolo dell'alfabeto:

- cambiano simboli ma non cambia il loro ordine

256! possibili **permutazioni** dell'alfabeto

La chiave di cifratura è la tabella con le corrispondenze di tutti i simboli (tabella 256x2)

Cifrario di Cesare è un codice di sostituzione monoalfabetica in cui ogni carattere viene sostituito con quello che lo segue di 3 posizioni nell'ordinamento alfabetico (la chiave in questo caso è 3).

Facilmente attaccabile

Esistono anche codici di sostituzione polialfabetica.

## Codici di trasposizione

si fissa un numero intero P (periodo della trasposizione) e si sceglie una permutazione degli interi da 1 a P

*se P=7 si può fare corrispondere alla successione*

*1 2 3 4 5 6 7 quella permutata 4 6 3 5 7 1 2*

- i simboli dell'alfabeto sono gli stessi ma cambia l'ordine

Il testo chiaro viene considerato a **blocchi di lunghezza P** byte ed i **P byte di ciascun blocco** vengono anagrammati in base alla permutazione

Per la decifrazione si usa la permutazione inversa

## Politiche miste

- *cifrario semplice*: unica trasformazione elementare
- *cifrario composto o di prodotto*: una serie di trasformazioni elementari in cascata

## Crittoanalisi

Permette di ottenere il testo in chiaro da un testo cifrato senza conoscere la chiave di cifratura

Il crittoanalista deve avere a disposizione della conoscenza

Attacco	Conoscenza a disposizione
con solo testo cifrato (ciphertext only)	Proprietà statistiche del linguaggio in uso e parole probabilmente presenti nel testo in chiaro
con testo in chiaro noto (known plaintext)	Termini sicuramente presenti nel testo in chiaro e testi cifrati successivamente resi in chiaro e di pubblico dominio (coppie <plaintext, ciphertext>)
con testo in chiaro scelto (chosen plaintext)	Testi cifrati corrispondenti a qualsiasi testo in chiaro che si ritenga possa essere utile ai fini della crittanalisi (coppie <scelto plaintext, ciphertext>)
con testo cifrato scelto (chosen ciphertext)	Qualsiasi testo cifrato che si ritenga possa essere utile ai fini della crittanalisi ed il corrispondente testo in chiaro (coppie <plaintext, scelto ciphertext>)

“

## La crittografia moderna

“

La crittografia moderna usa tre classi di algoritmi:

“

“

- a chiave segreta (simmetrici)
- a chiave pubblica (asimmetrici)
- funzioni hash

Un **sistema di crittografia** comprende:

- algoritmo
- chiave

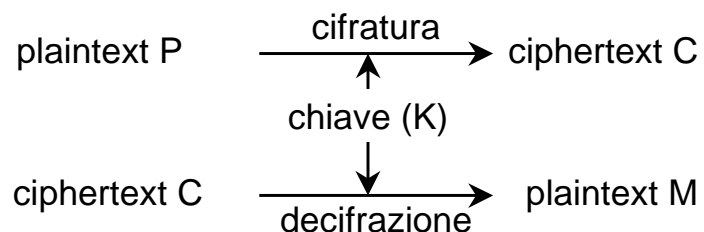
segretezza della chiave

segretezza dell'algoritmo ?

LA SICUREZZA DI UN SISTEMA DI CRITTOGRAFIA (CRITERI)

- L'algoritmo di cifratura noto (**principio di Kerchoffs**)
- Nessun sistema è *assolutamente* sicuro (sistemi teoricamente sicuri soluzione *non praticabile*)
- Si deve rendere *praticamente irrealizzabile* l'attacco (*tempo di vita delle info*)

## La crittografia a chiave segreta (simmetrica)



### funzione di cifratura

$$C = E(P, K) = E_K(P)$$

### funzione di decifrazione

$$P = D(C, K) = D_K(C)$$

con funzioni di cifratura e decifrazione l'una inversa dell'altra

$$E_K(D_K(C)) == C$$

$$D_K(E_K(P)) == P$$

## Impiego dei sistemi a chiave segreta

### Trasmissione su un canale insicuro

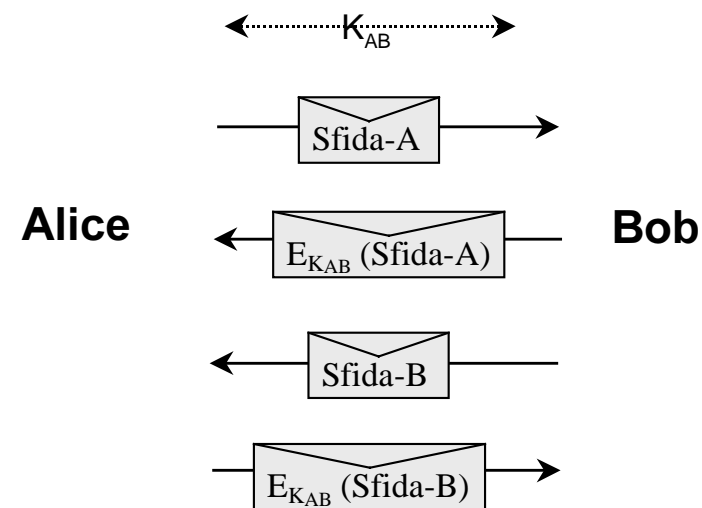
il messaggio cifrato non rivela l'informazione anche se intercettato  
richiede: condivisione chiave tra mittente e destinatario

### Immagazzinamento sicuro su un media insicuro

es. cifratura del file system

### Autenticazione

es. strong authentication



### Integrità dei messaggi

Message Integrity Code (MIC): il checksum cifrato del messaggio

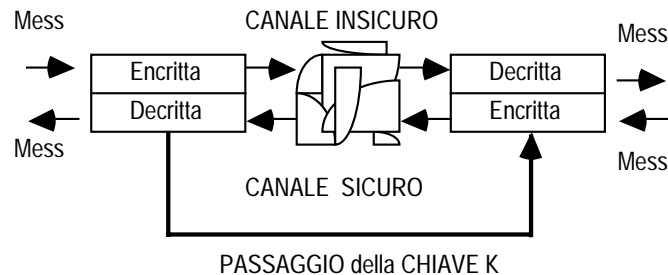
## Sistemi a chiave segreta

Sistemi con una chiave unica per cifrare e decifrare ( $K$ ) o con due chiavi diverse per cifrare e decifrare, ma comunque tra di loro collegate ( $K_e, K_d$ )

Algoritmo di pubblico dominio per la cifratura

### IBM Data Encryption Standard (DES)

DES (1977) *cifrario composto o di prodotto*  
con chiave di 56 bit con blocchi di 64 bit  
*algoritmo in 19 stage*



### Critiche al DES

insufficiente la lunghezza della chiave (56 bit)  
nel progetto originale pare fosse maggiore (128 bit)

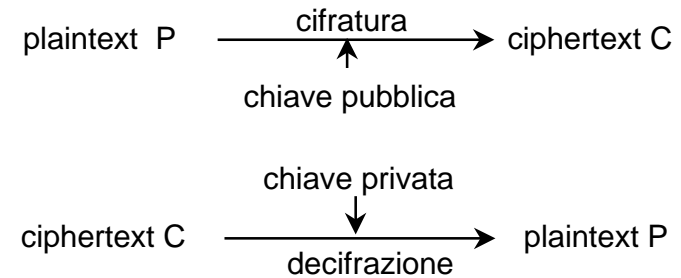
### IDEA (International Data Encryption Algorithm)

lunghezza di chiave a 128 bit

Possibilità di scorciatoie di decifrazione  
(paura del **grande fratello**)

## La crittografia a chiave pubblica (asimmetrica)

Usa due chiavi ed è molto difficile dedurre dall'una il valore dell'altra (chiave pubblica e chiave privata)



### funzione di cifratura

$$C = E(P, K_{pub}) = E_{K_{pub}}(P)$$

### funzione di decifrazione

$$P = D(C, K_{priv}) = D_{K_{priv}}(C)$$

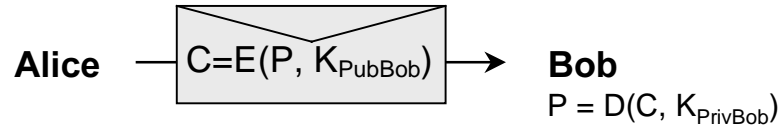
La chiave pubblica è resa di dominio pubblico

Costi computazionali per la cifratura e la decifrazione *molto* superiori al caso simmetrico

## Impiego dei sistemi a chiave pubblica

### Trasmissione su un canale insicuro

messaggio cifrato con la chiave pubblica del ricevente

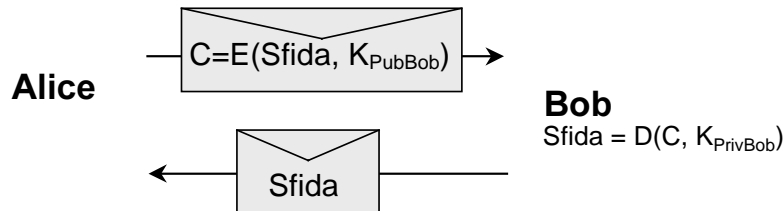


**Solo Bob** può decifrare C, ma non può sapere con certezza di chi sia il messaggio

### Immazzinamento sicuro su un media insicuro

i dati vengono cifrati con la propria chiave pubblica

### Autenticazione



Solo Bob può decifrare C

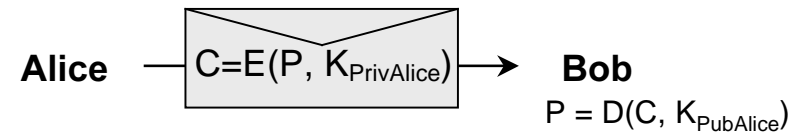
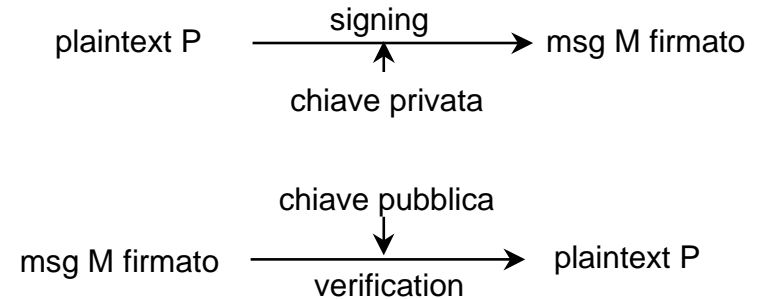
Questi problemi sono risolti anche con la crittografia a chiave segreta, ma nel caso di chiave pubblica:

### non è richiesta condivisione chiave

⊗ costo computazionale **molto** superiore

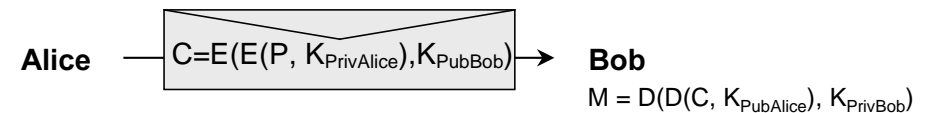
## Impiego dei sistemi a chiave pubblica

### Firma digitale



chiunque riconosce la *paternità* di P, perché solo Alice conosce la propria chiave privata

### Caso composto



### Doppia cifratura

Alice cifra M con la propria chiave privata poi cifra con la chiave pubblica di Bob

solo Bob può leggerlo e provare che arriva da Alice

## Sistemi a chiave pubblica

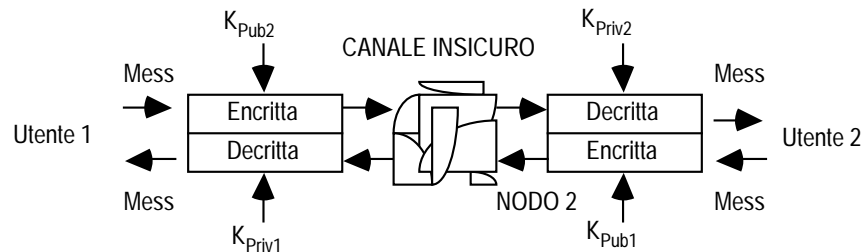
(Diffie Hellman 1976)

cifratura separata dalla decifrazione  
chiavi diverse

Chiave pubblica **K<sub>Pub</sub>**  
e privata **K<sub>Priv</sub>**

Invertibilità non facile

*Con chiave pubblica e algoritmo non si riesce analiticamente a ricavare la chiave privata*



Funzione unidirezionale ==> una funzione facilmente computabile ma la cui inversa non può essere computata a meno di informazioni sulla sua costruzione

## Algoritmo RSA (Rivest, Shamir, Adelman)

Uso di prodotto di due numeri primi molto alti **p** e **q**  
( $> 10^{100}$ )

$$N = p * q \quad Z = (p-1) * (q-1)$$

**d** è un numero primo rispetto a Z

$$i * d = 1 \pmod{Z}$$

i è quindi il più piccolo elemento della serie Z+1, 2Z+1, 3Z+1, ... divisibile per d

Il messaggio preso a blocchi di **f** bit, con  $2^f < N$

(M per blocco di messaggio e C per forma cifrata)

$$K_{pub} == (N, i) \quad \text{cifratura} \rightarrow M = C^i \pmod{N}$$

$$K_{priv} == (N, d) \quad \text{decifrazione} \rightarrow C = M^d \pmod{N}$$

e le due chiavi sono inverse

**K<sub>pub</sub>** è nota (N, i) e **K<sub>priv</sub>** (N, d) è la chiave privata

E se il possessore delle chiavi se ne va:  
il gestore deve conoscere entrambe le chiavi?

*fattorizzazione di un numero di 200 cifre*

*richiede 4 miliardi di anni*

*l'operazione per un numero di 500 cifre  $10^{25}$  anni*

## Efficienza

Algoritmi a chiave pubblica (es., RSA) hanno un costo computazionale molto superiore al caso di chiave segreta (es., DES).

In genere si usa un metodo a chiave pubblica per scambiarsi chiavi segrete di sessione per la comunicazione degli utenti (es., SSL)

Inoltre, è fondamentale il **problema della gestione** delle chiavi

### Gestore di sicurezza

fornisce le chiavi necessarie e controlla i partner che si devono impegnare in un contratto  
problema della revoca delle chiavi

## Problema della gestione delle chiavi

### Crittografia a chiave pubblica

- una coppia di chiavi per ogni utente
- problema della Certification Authority
- le chiavi pubbliche sono di pubblico dominio
- infrastrutture per chiavi pubbliche (PKI)

### Crittografia a chiave segreta

- ogni persona deve condividere una chiave con gli altri  
$$N_c = (N_u^2 - N_u) / 2$$
- Oppure utilizzo di un key distribution centre (KDC)

## Dimensionamento delle chiavi

Attacco di *forza bruta*, cioè provare la decifrazione del messaggio con tutti i possibili valori di chiave

$$T_{\max} = \tau * 2^n / N$$

$T_{\max}$  = tempo *massimo* richiesto per scoprire la chiave

$\tau$  = tempo richiesto per una verifica

$n$  = lunghezza della chiave (numero di bit)

$N$  = Numero di calcolatori in parallelo

Esempio:

DES, chiave a 56 bit  $2^{56} \approx 10^{16}$

calcolatore che prova  $10^6$  chiavi al secondo,

$T = 2000$  anni

Macchina a parallelismo massiccio, costo 1 milione \$

$T = 3,5$  ore

Macchina a parallelismo massiccio, costo 10 milioni \$

$T = 21$  minuti

DES esportato fuori da USA a 40 bit

IDEA a 128 bit

## Clipper

Riservatezza della comunicazione

Vs

possibilità intercettazioni telefoniche

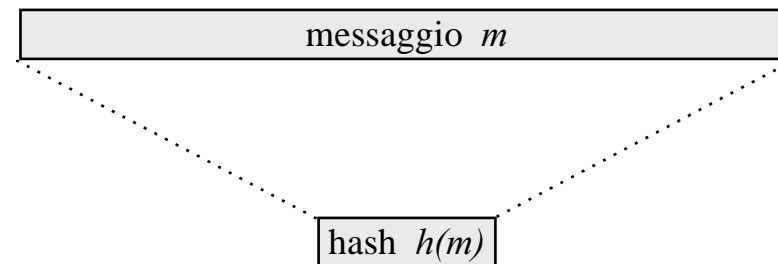
Clipper è un chip per la crittografia delle comunicazioni, l'algoritmo di crittografia è segreto (SKIPJACK) e usa una chiave segreta per ogni chip (utente)

Il possesso della chiave di un utente permette di decifrare le sue conversazioni

*Negli USA la chiave è spezzata in due parti, ciascuna parte è custodita da un Dipartimento diverso e si concede la decifrazione solo su motivi gravi e fondati (problema della custodia delle chiavi, key escrow)*

## Funzioni Hash

Una funzione hash comprime un input  $m$  di lunghezza arbitraria in un output  $h(m)$  di lunghezza fissa e di piccole dimensioni



Caratteristiche funzione hash:

- per ogni messaggio  $m$  è facile calcolare  $h(m)$
- dato  $h(m)$  è difficile trovare un  $m$  che lo fornisca
- deve essere difficile trovare due  $m$  con lo stesso  $h(m)$



## Impiego degli algoritmi Hash

### Password hashing

password cifrata registrata su file  
hash della password cifrata su file

### Integrità dei messaggi

hash usata per generare MIC del messaggio  
hash (messaggio+password)

### Impronta dei file

MIC di un file per accertarsi della sua integrità

### Efficienza delle firme digitali

si firma l'hash del messaggio

## Sistemi di Gestione delle Chiavi

### Problematiche di gestione delle chiavi crittografiche:

- Generazione sicura
- Memorizzazione sicura (es. smart card)
- Reperimento e distribuzione sicura

### Sistemi per la distribuzione delle chiavi:

- Simmetriche (es. Kerberos)
- Pubbliche (Infrastrutture a Chiave Pubblica –PKI)

### Distribuzione delle Chiavi in Sistemi Simmetrici

Le chiavi simmetriche devono essere distribuite in modo assolutamente sicuro; in sistemi con numeri elevati di utenti questo costituisce un problema sostanziale (una rete di  $n$  utenti richiede la distribuzione di  $(n(n-1)/2)$  chiavi (10 utenti richiedono 45 differenti chiavi, 100 utenti richiedono 4950 chiavi))

### Possibili soluzioni sono:

- meccanismo punto-punto
- centro di distribuzione delle chiavi (Key Distribution Center)

# Kerberos

**Kerberos** è un protocollo per l'**autenticazione** in un sistema distribuito **cliente/servitore**

**Kerberos** fa parte del progetto **Athena MIT**  
(e adottato anche in DCE e Andrew)

## Assunzioni sull'ambiente:

- utenti non fidati
- rete non sicura

## Kerberos usa chiavi segrete

Validità temporale limitata delle operazioni

Servizi differenziati

- per il sistema:

**servizio di Autenticazione**  
**servizio di Ticket**

- per ogni servizio:

**gestione dell'autenticazione**

Passi ed entità

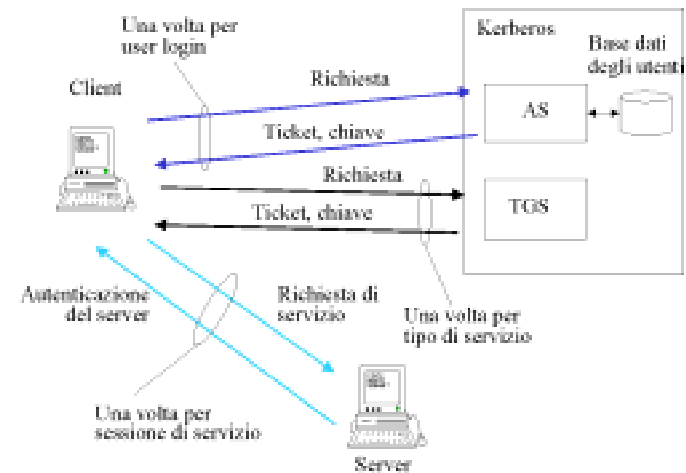
- **Authentication Server (AS)**
- **Ticket Granting Server (TGS)**
- Ogni server deve essere noto al gestore dell'autenticazione

Circolano **token** diversi

- **ticket**, dal TGS al cliente
- **authenticator**, dal cliente al server  
*con informazioni di tempo e usato una volta sola*
- **chiavi di sessione**, dal cliente al server

# Kerberos

(Descrizione Sintetica)



- **Cliente-Authentication Server:**  $\{N_{cliente}, N_{tgs}, T_{corrente}\}$
- **Authentication Server:**  
al ticket service invia il  $Ticket_{sessiontgs}$ :  
 $\{K_{sessiontgs}, N_{cliente}, T_{corrente}, WS, Lifetime\}K_{tgs}$   
con WS indirizzo della workstation richiedente  
al client:  
 $Ticket_{sessiontgs}.\{K_{sessiontgs}, N_{tgs}, Lifetime, T_{corrente}\}K_{cliente}$

- **Cliente:**

Creazione del Authenticator<sub>tgs</sub>:

**{Ncliente, Tcorrente, WS}Ksessionetgs**

Cliente al TGS:

**{Authenticator<sub>tgs</sub>, Ticket<sub>sessionetgs</sub>, Nservizio}**

- **Ticket Granting Service:**

Creazione del Ticket<sub>sesservizio</sub>:

**{Ksesservizio, Ncliente, Tcorrente, Lifetime}Kservitore**

TGS al Cliente:

**Ticket<sub>sesservizio</sub>, {Ksesservizio, Nservizio, Tcorrente}Ksessionetgs**

- **Cliente al Servitore:**

Creazione dell'Authenticator<sub>servizio</sub>:

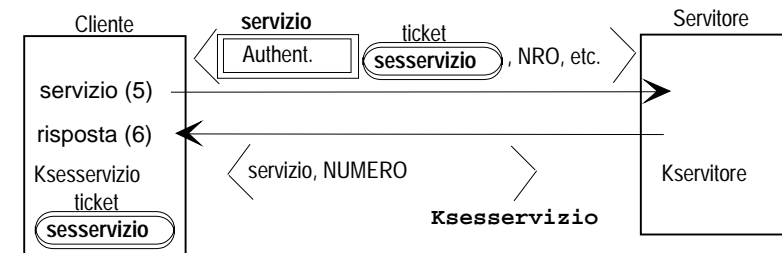
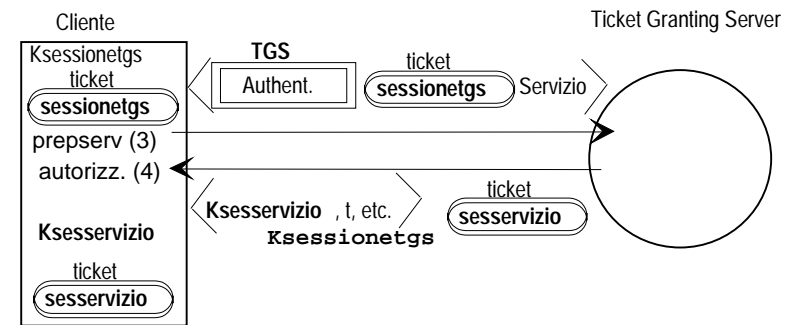
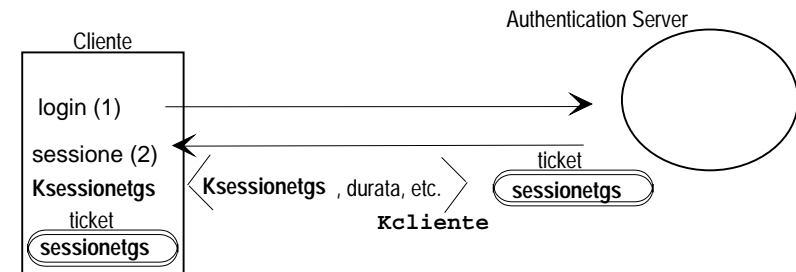
**{Ncliente, Tcorrente, WS}Ksesservizio**

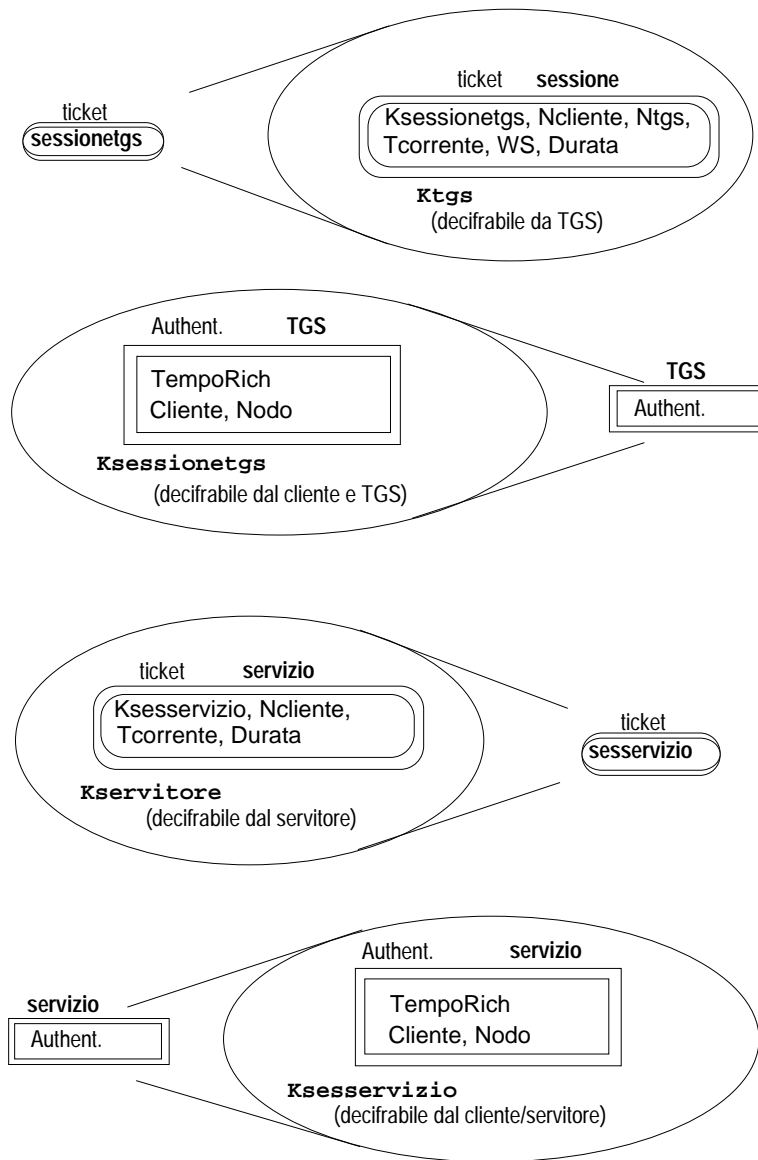
Cliente al Servitore:

**{Authenticator<sub>servizio</sub>, Ticket<sub>sesservizio</sub>}**

- **Servitore al Cliente:**

**{Nservizio, Tcorrente+1, Serveraddress}Ksesservizio**





## FASI

### 1) Cliente interagisce con Authentication Server

Cliente al *Login* inserisce lo *Username* spedito in chiaro all'Authentication Server con *Timestamp* con data ed ora

(1) Cliente ---->AS

**{Ncliente, Ntgs, Tcorrente}**

I valori interi sono identificatori per l'unicità

### 2) TGS crea il ticket e lo restituisce al Cliente

Il **Ticket Granting Service** localizza la password corrispondente allo Username e crea per la sessione il **ticket sessionetgs**

**{Ksessionetgs, Ncliente, Tcorrente, WS, Lifetime}Ktgs**  
WS indirizzo della workstation richiedente

*messaggio alla Workstation del Cliente*

(2) AS (TGS) ---->Cliente

**Ticket sessionetgs , {Ksessionetgs, Ntgs, Lifetime, Tcorrente}Kcliente**

l'utente inserisce la password

confrontata e cancellata subito dopo

Si verificano  $T_{corrente}$  e  $N_{tgs} ==>$

*il Cliente è certo che arriva dal sistema di gestione*

*ed è l'unico a poterlo decifrare*

memorizzazione di **Ksessionetgs** e **Ticket sessionetgs**

per dopo

**Client e Authentication Server in reciproca fiducia**

## SERVIZIO VERO E PROPRIO

### 3) Cliente prima di una richiesta a un Servitore manda una richiesta al TGS (Ticket Granting Server)

quando il Client ha bisogno di un servizio  
prepara un Authenticator

$\text{Authenticator}_{\text{TGS}} \Rightarrow \{N_{\text{cliente}}, T_{\text{corrente}}, WS\}K_{\text{sessionetgs}}$   
ed spedisce al TGS

(3) Cliente ---->TGS

$\{\text{Authenticator}_{\text{TGS}}, \text{Ticket}_{\text{sessionetgs}}, N_{\text{servizio}}\}$

Ticket-Granting Service decifra il Ticket

*Se OK, decifra l'Authenticator mediante la chiave di Sessione cioè  $K_{\text{sessionetgs}}$*

### 4) TGS per il Cliente

Se tutto è regolare, TGS prepara il  $\text{Ticket}_{\text{sesservizio}}$

$\{K_{\text{sesservizio}}, N_{\text{cliente}}, T_{\text{corrente}}, \text{Lifetime}\}K_{\text{servitore}}$

$K_{\text{sesservizio}}$  una **Chiave di Servizio** per la sessione di comunicazioni tra Client e Servitore

(4) TGS ---->Cliente

$\text{Ticket}_{\text{sesservizio}}, \{K_{\text{sesservizio}}, N_{\text{servizio}}, T_{\text{corrente}}\}K_{\text{sessionetgs}}$

Il Client, possiede  $K_{\text{sessionetgs}}$ , decifra il pacchetto, ne verifica l'autenticità e memorizza  $K_{\text{sesservizio}}$  e  $\text{Ticket}_{\text{sesservizio}}$

### 5) Cliente al Servitore

il Cliente costruisce l' $\text{Authenticator}_{\text{servizio}}$

$\{N_{\text{cliente}}, T_{\text{corrente}}, WS\}K_{\text{sesservizio}}$

Il Cliente manda al Servitore

(5) Cliente ---->Servitore

$\{\text{Authenticator}_{\text{servizio}}, \text{Ticket}_{\text{sesservizio}}\}$  ed altro

Il Servitore decifra il Ticket con chiave privata  $K_{\text{servitore}}$   
Se ci riesce e se Ticket/Authenticator non sono "scaduti", il Ticket proviene da *Kerberos*

*Dopo una disconnessione, una riconnessione al Servitore può usare lo stesso Ticket*

*Authenticator deve essere ricreato ogni volta (Timestamp aggiornato)*

### 6) Mutual Authentication

Garanzia che il Servitore sia quello corretto attraverso una prova al Cliente

Messaggio di risposta del Servitore al Cliente

$\{N_{\text{servizio}}, T_{\text{corrente}}+1, \text{Serveraddress}\}K_{\text{sesservizio}}$

Il valore dimostra la autenticità del Servitore

## Kerberos: considerazioni conclusive

**Kerberos usa chiavi segrete**

**Kerberos sviluppato per un ambiente con:**

- utenti non fidati
- rete non sicura

**Le password degli utenti NON viaggiano sulla rete e sono note a:**

- utenti
- AS del KDC

**Chiavi segrete dei servizi sono note a:**

- servitori
- TGS del KDC

Per assicurare una **validità temporale limitata** delle operazioni richiede una loose synchronization tra i nodi.

Replicazione KDC

Partizionamento rete in "realm"  
(relazioni di fiducia tra diversi realm)

Problemi con NFS:

NFS è stateless → autenticazione ogni richiesta costoso →  
si autentica solo il mount

## Distribuzione delle Chiavi in Sistemi Asimmetrici

L'elenco delle chiavi pubbliche è un potenziale punto debole per la sicurezza del sistema

Esiste il problema della **autenticità delle chiavi pubbliche**:

un utente può in malafede pubblicare una chiave a nome di un altro ed utilizzarla per sostituirsi a lui

Si ricorre a terze parti, dette **Certification Authority**, che garantiscono l'integrità e l'autenticità dell'elenco delle chiavi pubbliche

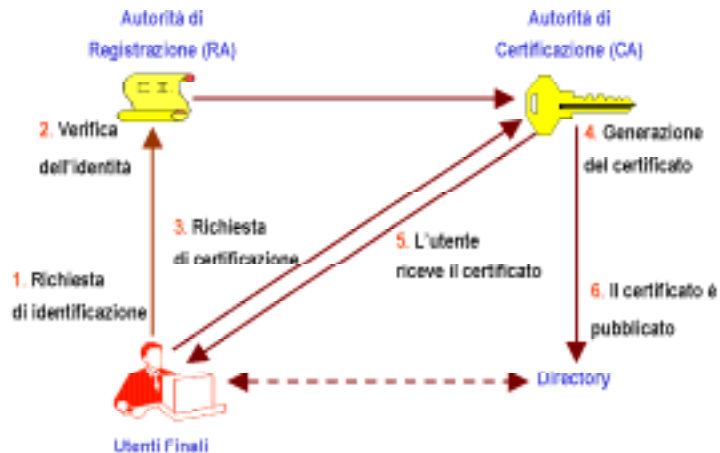
la Certification Authority deve essere al di sopra di ogni sospetto, compatibilmente con il livello di sicurezza desiderato

Tali Certification Authority costituiscono componenti essenziali delle cosiddette PKI

## Infrastrutture a Chiave Pubblica

### Funzionalità:

- generazione e distribuzione sicura delle chiavi;
- emissione e distribuzione di certificati;
- validazione di certificati;
- aggiornamento e revoca di chiavi e certificati



### Funzionalità specifiche di una CA:

- associazione di chiavi pubbliche a identità fisiche attraverso la creazione di un certificato elettronico
- distribuzione, aggiornamento e revoca di un certificato

## Certificato Elettronico: struttura

Il certificato si compone di almeno due parti:

- nome e indirizzo dell'utente
  - chiave pubblica dell'utente
- Tramite una funzione hash si trasforma in un blocco di lunghezza fissa che viene cifrato, con la chiave privata, dall'Authority
  - Solo utilizzando la chiave pubblica dell'Authority è possibile avere la funzione hash in chiaro e quindi verificare il certificato

	Versione
	Numero di serie
Identif. Algoritmo	Algoritmo Parametri
	CA emittitrice
	Validità temporale
	Soggetto
Identif. Chiave pub.	Algoritmo, parametri, chiave
	Firma

- Il numero di serie identifica in modo univoco il certificato
- CA è la Certification Authority che ha prodotto il certificato
- Il certificato ha validità limitata nel tempo
- La firma è un hash di tutti i campi precedenti del certificato

## Modelli di Revoca

- **push**  
l'utente finale richiede lo stato di revoca del certificato
- **pull**  
lo stato di revoca di un certificato viene comunicato agli interessati da parte della CA o di un servizio delegato da essa

### Esempi di Meccanismi:

- liste di revoca  
la CA a tempi predefiniti pubblica sulla directory una lista firmata contenenti tutti i certificati revocati. Un certificato revocato viene rimosso dalla lista solo allo scadere della sua validità temporale.
- online certificate status protocol  
lo stato di revoca di uno specifico certificato viene richiesto *on demand* ad un servizio on line

**Problemi:** tradeoff tra requisiti di sicurezza delle applicazioni e carico computazionale (per l'utente finale, per la CA, per la directory)

Esempio: carico computazionale per l'utente finale

CRL:	OCSP:
$L_{user} = (I_{sn} + I_{ts}) * R * L_h + L_{sig}$	$L_{user} = I_{ocsp} * L_h + L_{sig}$

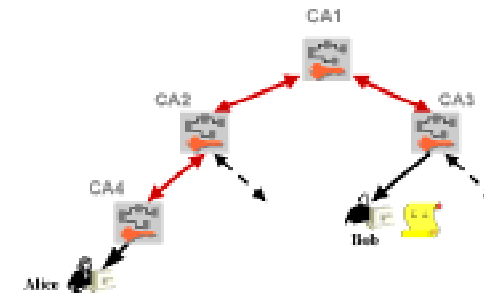
$I_{sn}$  = numero di bit serial number (default 20)  
 $I_{ts}$  = numero di bit timestamp  
 $L_h$  = tempo per calcolare un hash  
 $L_{sig}$  = tempo di firma  
 $R$  = numero di certificati revocati periodicamente

## Modelli di fiducia

### Problema:

Alice deve verificare l'autenticità di un messaggio inviato da Bob. Deve effettuare:

- recupero del certificato di Bob
  - convalida del certificato in termini di autenticità e stato
- ⇒ necessità di un "cammino di certificazione" tra Alice e Bob => problemi di efficienza nel ritrovamento e convalida di un cammino di certificazione



Cammino di Certificazione:

Subject: Alice	Subject: CA 4	Subject: CA 2	Subject: CA 3	Subject: Bob
CA 3 Public Key	CA 3 Public Key	CA 3 Public Key	CA 3 Public Key	Bob Public Key
Issuer: CA 4	Issuer: CA 1	Issuer: CA 1	Issuer: CA 1	Issuer: CA 3

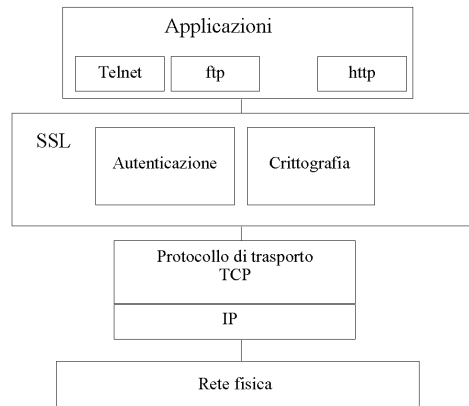
Il ritrovamento e la convalida di un cammino di certificazione dipendono dal tipo di modello di fiducia instaurato da diverse CA:

- gerarchico
- distribuito



## Secure Socket Layer (SSL) (1.)

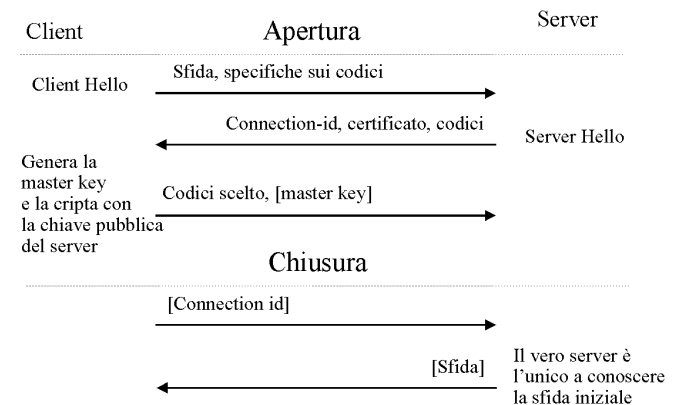
- Inizialmente proposta da Netscape, al momento in fase di standardizzazione in ambito IETF col nome di TSL
- Utilizza una combinazione di codici per la varie funzioni da svolgere
- Si colloca logicamente fra strato di trasporto e applicazioni: *non richiede una modifica delle applicazioni*



## SECURE SOCKET LAYER (SSL) (2.)

E' logicamente suddiviso in due parti:

- SSL Handshake Protocol (SSLHP)
  - negozia l'algoritmo simmetrico da utilizzare
  - si occupa dell'autenticazione di client (opzionale) e server
  - invia la chiave segreta (master key) utilizzata per lo scambio dei dati
- SSL Record protocol (SSLRP)
  - impacchetta i dati da inviare in records
  - si occupa della cifratura/decifratura dei records in modo conforme a quanto negoziato



## Intranet e Internet

Internet rete intrinsecamente insicura

Collegamento di Intranet aziendali ad Internet è un problema molto sentito, soprattutto per:

- economicità (*basso costo collegamenti*)
- mercato globale (*WWW*)
- supporto mobilità utenti

### Principio fondamentale

*se si vuole essere sicuri, è meglio  
non essere connessi*

### Possibilità

di accedere ai servizi di rete

*accesso dall'interno verso l'esterno*

*accesso dall'esterno verso l'interno*

**senza compromettere il sistema interno**

Per le **organizzazioni commerciali** o **bancarie**

diventa vitale trovare soluzioni accettabili

A parte la **disconnessione**

*possibili politiche e meccanismi di separazione*

tra gli **ambienti** eventualmente **sicuri interni (Intranet)** e **Internet** (*uso di sistemi firewall e VPN*)

## Fattori di perdita di sicurezza di Internet

TCP/IP come sistema aperto

*uso di risorse esterne per routing*

*vulnerabilità intrinseche dei servizi e protocolli*

*estrema complessità di meccanismi di controllo*

Facilità di monitoraggio dell'attività di rete:

*comunicazioni in chiaro*

Controllo degli accessi e autenticazione utenti

*basati su password (statiche e riusabili)*

Connessioni di rete tramite risorse esterne

*linee condivise e router di terzi*

## Firewall

Un **firewall** garantisce la sicurezza del collegamento di una Intranet verso Internet.

Un firewall è un sistema costituito di molti componenti che:

- costituisce l'**unico punto di contatto** della rete **interna** con l'**esterna**
- filtra e **controlla** tutto il traffico tra le due reti.
- concentra i **meccanismi di sicurezza**
- impone la **politica di sicurezza** della organizzazione
- nasconde informazioni della rete interna
- registra eventi (**logging**) ed elabora statistiche sul traffico di rete (**auditing**)

### Separazione politiche-meccanismi

Attenzione alla scelta dei servizi che devono transitare attraverso il firewall.

## POLITICHE DI UN FIREWALL

il **firewall** deve implementare una **politica di accesso** in modo **separato e concentrato**

===>

- ⊖ senza firewall le stesse funzioni vengono ottenute attraverso la cooperazione di tutti gli host

### Problemi

un firewall non risolve tutti i problemi

- ⊖ un **firewall** restringe la possibilità di accesso a servizi
- ⊖ la topologia di rete può essere inadeguata a un firewall
- ⊖ non protegge contro i **virus**
- ⊖ problemi di **attacchi interni**  
==> *giusto compromesso tra sicurezza e funzionalità*
- ⊖ attenzione alle vie di accesso secondarie (**backdoor**)  
==> *accesso tramite modem*
- ⊖ come punto **concentrato** di affidabilità  
ma può diventare un **collo di bottiglia** (bottleneck)

## Aspetti progettuali da considerare in un firewall

- esigenze da soddisfare (quali servizi)
- architettura
- autenticazione
- politica di autorizzazione di rete

## Metodologie di autenticazione

tecniche di autenticazioni robuste

anche basate su meccanismi differenziati

*password usa e getta (one-time password)*

*carta magnetica*

*impronta digitale*

==> caratteristica comune

**utilizzo di password non riusabili**

## Politiche di autorizzazione opposte

***tutto ciò che non è espressamente permesso è vietato***

- maggiore sicurezza
- più difficile da gestire

***tutto ciò che non è espressamente vietato è permesso***

- minor sicurezza
- più facile da gestire

## Problemi di efficienza

Il firewall comporta una inefficienza nei servizi che sono disponibili e un ritardo nei tempi di risposta

il firewall *potrebbe anche diventare il collo di bottiglia dell'intero sistema*

## Considerazioni generali

- grossi oggetti sono difficili da verificare  
(*'grande non è bello'*)
- se una risorsa dinamica non è attiva non preoccupa
- definire assunzioni di default => tutti sono sospettati
- usare risorse dedicate solo ai meccanismi di sicurezza

## Esempi di configurazioni di sistemi firewall

- grado di controllo sugli errori e buchi di sicurezza
- zona di rischio (# di host esposti a possibili attacchi)
- politica di autorizzazione adottata

**Router** *un gateway che separa la rete interna dalla esterna*

**Dual-Home gateway** *macchina sicura con due accessi separati alla rete*

**Bastion host** *macchina sicura dedicata al controllo del sistema per la sicurezza ==> **auditing** ossia verifica e traccia degli eventi nel sistema*

## Packet filtering (filtraggio livello rete)

il traffico filtrato sulla base dei campi contenuti nel datagramma IP

*sourceIP*                      *sourcePORT*  
*destinationIP*                *destinationPORT*

Si possono così

*escludere alcuni host come mittenti o come destinatari*  
*escludere alcuni servizi*

azioni specificate a mano

tipo	Indirizzo destination	Indirizzo source	Porta destin.	Porta source	Azione
TCP	137.204.57.33	*	23	>1023	permit
TCP	137.204.57.32	*	25	>1023	permit
TCP	137.204.57.34	*	25	>1023	permit
TCP	137.204.57.31	137.2.5.30	119	>1023	permit
TCP	*	*	*	*	deny

vedi il file */etc/services*

“

### problemi

“

- difficoltà in caso di
  - ⊖ servizi RPC
  - ### più interfacce
- difficoltà di specificare in modo compatto regole
- mancanza di logging

## Application gateway

i problemi del **packet filtering** si possono superare con proxy

*ciòé gestori ad-hoc per consentire il trattamento solo di uno specifico servizio*

### proxy server

**applicazione software** col compito di mediare il traffico tra rete esterna ed interna e consentire accesso a un servizio specifico

### vantaggi

∅ filtra *servizi e protocolli*

### supporta *autenticazione* robusta e *logging*

### semplifica le regole del *filtering*

### garantisce riservatezza alla rete interna

∅ incide positivamente sul costo

i proxy devono essere concentrati sul solo firewall e non distribuiti su tutti gli host della rete

### svantaggi

⊖ connessioni con host interno a due passi

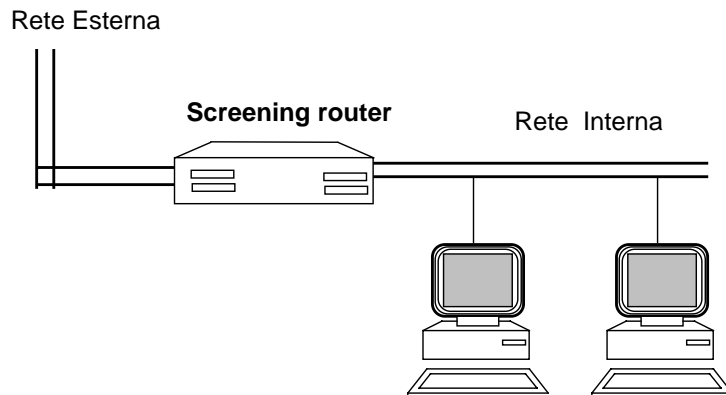
**perdita di trasparenza del firewall**

*a meno di modificare i clienti per i servizi di rete più comuni*

## Screening router

un **router** fa da filtro tra le **due reti** (interna ed esterna)

- questo firewall usa il router per filtrare il traffico
- non necessita di proxy
- implementare la politica  
*tutto ciò che non è espressamente permesso è proibito*



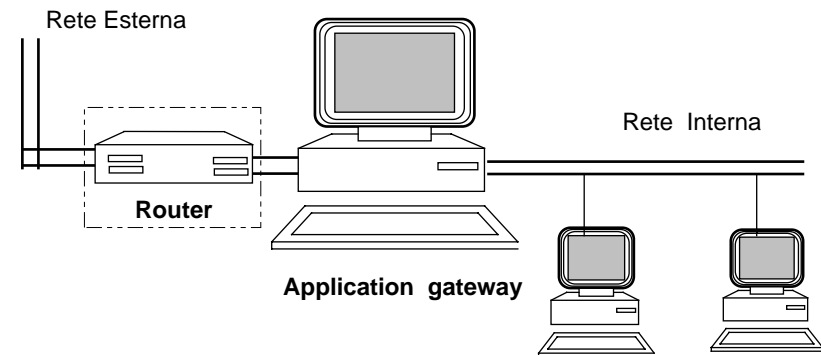
### problemi

- ⊖ basso livello di sicurezza introdotto  
ogni host necessita  
di robuste misure di autenticazione==>  
*la zona di rischio è pari al numero di host della rete*
- ⊖ regole di packet-filtering difficili da specificare sul router
- ⊖ mancanza di logging

## Dual homed gateway

**stazione** dotata di due **interfacce** di rete con effettiva separazione fisica tra rete interna ed esterna

a volte si aggiunge anche un **router** sulla connessione esterna per packet-filtering



∅ alto livello di privacy

### misure robuste di autenticazione

### logging facile

### implementa politica di accesso più rigida

### proxy per servizi standard: **telnet, ftp, e-mail**

### mancanza di flessibilità in caso di modifiche di servizi e sovraccarico di lavoro concentrato sul gateway

### gateway stesso come *zona di rischio* e come *collo di bottiglia*

## Screened host firewall

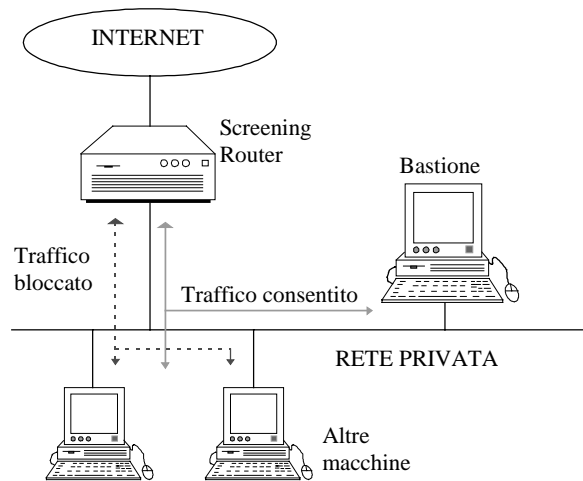
costituito da un **bastion host** e da **una rete interna**

### application-gateway sul bastione

==> si affaccia direttamente sulla rete interna e passa le informazioni all'interno

### router

==> blocca i pacchetti dall'esterno/interno tranne quelli in arrivo/invio da application gateway



- flessibilità maggiore rispetto al dual-homed
- allenta il controllo su certi servizi/host  
implementa entrambe le politiche di autorizzazione

### problemi

### costo della soluzione

### la rete interna non presenta ulteriori barriere di protezione a parte il gateway,

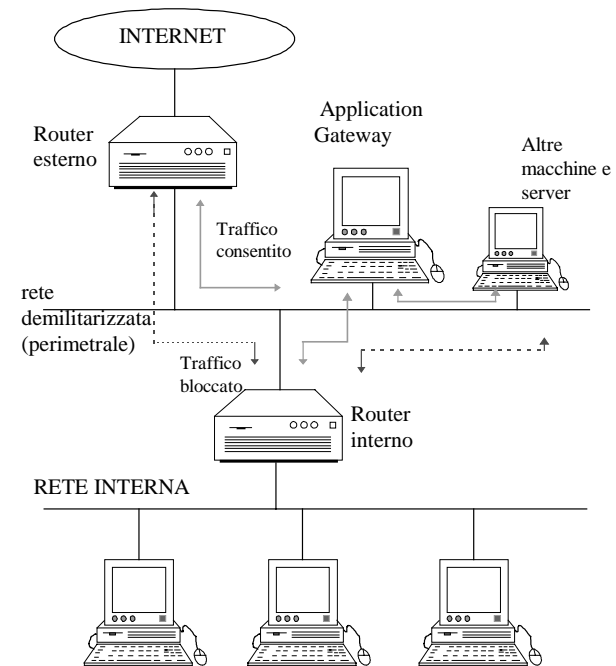
## Screened Subnet Firewall

### router per esterno

- inoltra traffico dall'esterno agli **application gateway**  
server e-mail e information server (anche host diversi)
- inoltra traffico dagli application gateway all'esterno
- *altro traffico rifiutato*

### router per interno

- inoltra traffico dagli application gateway all'interno
- inoltra traffico ftp, gopher dall'interno agli information server della rete demilitarizzata
- *altro traffico rifiutato*



**vantaggi:**

### non c'è alcun accesso al **sistema interno**

### si garantisce elevato throughput considerando due router con intrinseca **ridondanza**

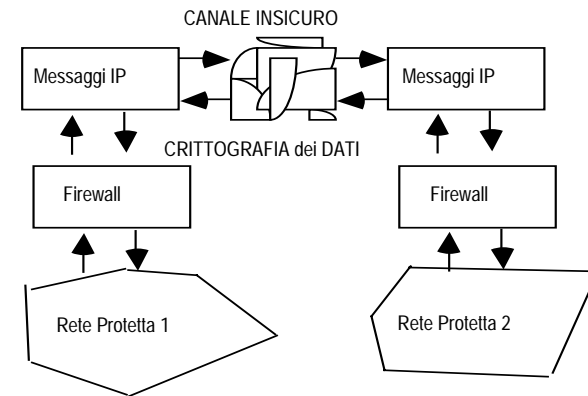
☺ anche **autenticazione avanzata** sugli application gateway

### gestione più complessa delle risorse

## IP tunneling

Tecnologia con cui un pacchetto di un qualunque protocollo viene incapsulato in un datagramma IP.

Esempio: i pacchetti NetBeui incapsulati in un datagramma IP possono muoversi su Internet.



possibile applicazione della crittografia al sistema, con **chiavi note** solo all'interno dei due sistemi protetti



## IPsec (secure IP)(RFC 2401)

Protocollo IP sicuro, fornisce la cifratura a livello IP, più in basso di SSL o VPN.

- Protegge da sniffing, modifica, ripetizione di messaggi
- Protegge le intestazioni e/o i dati dei pacchetti
  - **Authentication Header (AH)** : autentica l'origine dei datagrammi e protegge dalla loro replicazione (opzionale)
  - **Encapsulation Security Payload (ESP)** : garantisce la segretezza dei dati, autentica ed impedisce la replicazione
- Security Parameter Index (SPI) contenuto in ogni intestazione conforme a IPsec definisce le chiavi e gli algoritmi utilizzati

## IPSec: Security Association

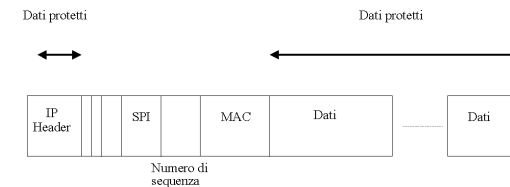
- La security association SA è una struttura dati che contiene le informazioni necessarie per realizzare una connessione sicura:
  - simplex (in una sola direzione)
  - utilizzando ESP o AH (non entrambe)
- E' indirizzata univocamente dalla combinazione di SPI, numero IP e protocollo di sicurezza (AH o ESP)
- Specifica:
  - algoritmi e chiavi di autenticazione e crittografia
  - il tempo di vita delle chiavi e della SAun numero di sequenza per impedire la replicazione

## IPSec: gestione delle SA

- Le SA devono essere gestibili in modo automatico
- A questo scopo esiste un protocollo ad hoc per la:
  - creazione
  - negoziazione
  - modifica
  - cancellazione di SA
- Questo protocollo si chiama Internet Key Exchange (IKE) e opera in due fasi:
  - durante la prima fase crea un canale sicuro fra due host e definisce le SA da utilizzare per la negoziazione
  - negozia le SA per le varie sessioni di comunicazione

## IPSec: AH (RFC 2402)

- Autentica ma lascia in chiaro i datagrammi,
  - non impone funzioni di cifratura/decifrazione per ogni intestazione in ogni router
- SPI dice all'host ricevente:
  - quale hash utilizzare
  - quale chiave utilizzare unitamente all'hash

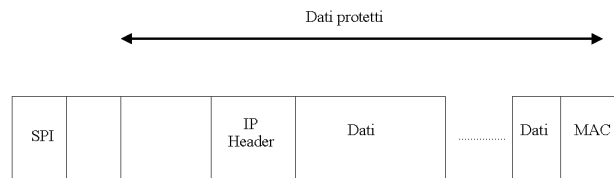


## IPSec: AH

- Operazioni di default:
  - hash con MD5, uso di un HMAC
  - abilitazione di anti-reply
- Operazioni opzionali
  - SHA-1 al posto di MD5
  - HMAC può essere disabilitato
  - anti-reply può essere disabilitato

## IPSec: ESP (RFC 2406)

- Dati e intestazione sono criptati ed autenticati
- SPI specifica
  - quale algoritmo utilizzare
  - se è stata utilizzata AH oltre ad ESP
  - quale chiave utilizzare



## IPSec: ESP

- Default:
  - DES per la crittografia
  - uso di AH
- Operazioni opzionali
  - altri algoritmi (IDEA, CAST,

## VPN (Virtual Private Network)

Una VPN realizza una Intranet privata virtuale al di sopra di una rete pubblica (Internet).

Macchine di sottoreti diverse all'interno di una stessa organizzazione possono cooperare direttamente.

Integrazione di diversi Firewall e di macchine mobili.

Vantaggi VPN:

- Trasparenza per utenti
- Supporto alla mobilità utenti
- Economicità del collegamento

Tecnologie:

**PPTP** (Point to Point Tunneling Protocol) tipicamente collegato al RAS (Remote Access Services) di Win NT (che esegue autenticazione e cifratura).

**Altavista tunnel** della Digital.

**Cisco PIX Firewall**, soluzione HW, veloce ed efficiente ma scarso supporto utenti mobili.

## Riferimenti su Internet Security

(da <http://www.lia.deis.unibo.it/Staff/CesareStefanelli/Security.htm>)

### Libri

Applied Cryptography - Protocols, Algorithms and Aource code in C, Bruce Schneier, John Wiley & Sons, 1995  
(schneier@counterpane.com [www.counterpane.com](http://www.counterpane.com))  
Network Security, Kaufman, Perlman, Speciner, Prentice Hall, 1995.  
Security in Computing, C. Pfleeger, Prentice Hall  
Practical Unix Security, Garfinkel, Spafford, O'Reilly  
Java Security, S. Oaks, O'Reilly, 1998.  
Virtual Private Network, C. Scott, P. Wolfe, M. Erwin, O'Reilly, 1998.  
"Computer Communications Security: Principles, standards, protocols and techniques" di Warwick Ford, Prentice Hall  
"Handbook of applied cryptography" di A.J.Menezes, P.C.van Oorschot, S.A.Vanstone, CRC Press  
Firewalls and Internet Security, Cheswick, Bellovin, Addison Wesley  
Building Internet Firewalls, Chapman, Zwicky, O'Reilly  
"Protecting your Web Site with Firewalls" di Marcus Goncalves, Prentice Hall  
Trusted Computer System Evaluation Criteria. DOD 5200.28-STD, National Computer Security Center, December 1985. (Orange Book)  
Trusted Database Management System Interpretation. NCSC-TG 021, April 1991. (Lavender Book)  
Trusted Network Interpretation. NCSC-TG 005, National Computer Security Center, August 1990. (Red Book)  
Information Technology Security Evaluation Criteria (ITSEC). Department of Trade and Industry, London, June 1991. Harmonized Criteria of France, Germany, the Netherlands, and the United Kingdom.

### Site

[www.cert.org](http://www.cert.org) : CERT (computer emergency response team) charter is to work with the Internet community to facilitate its response to computer security events involving Internet hosts  
[www.cryptocom.com](http://www.cryptocom.com) cifrare o non cifrare?  
<http://www.zurich.ibm.com/Technology/Security/> IBM  
<http://www.zurich.ibm.com/Technology/Security/extern/internet/white-paper.html>  
<http://www.nist.gov/> NIST (National Institute of Standards and Technology)

<http://www.itl.nist.gov/div893/> NIST, Computer Security Division  
[www.swcp.com/~iacr/proceedings/alldata\\_byname.html](http://www.swcp.com/~iacr/proceedings/alldata_byname.html) (IACR conference proceedings, by author name);  
[www.swcp.com/~iacr/jofc/jofc.html](http://www.swcp.com/~iacr/jofc/jofc.html) (Journal of cryptology bibliography and table of contents, from IACR)  
<http://web.mit.edu/security/www/iso1.html>  
news: alt.security  
news: sci.crypt

### University sites:

[theory.lcs.mit.edu/~rivest/crypto.bib](http://theory.lcs.mit.edu/~rivest/crypto.bib) (Ron Rivest's Crypto and Security bibliography)  
Cambridge [www.cl.cam.ac.uk/Research/Security](http://www.cl.cam.ac.uk/Research/Security)  
Purdue COAST project [www.cs.purdue.edu/coast/coast.html](http://www.cs.purdue.edu/coast/coast.html)  
Carnegie Mellon [www.ini.cmu.edu/netbill](http://www.ini.cmu.edu/netbill)  
Ross Anderson [www.cl.cam.ac.uk/users/rja14](http://www.cl.cam.ac.uk/users/rja14)  
Carl Ellison ( [www.clark.net/pub/cme/home.html](http://www.clark.net/pub/cme/home.html))

### Algoritmi crittografici

[www.rsa.com](http://www.rsa.com) RSA Data Security, Inc.  
[www.cs.berkeley.edu/~daw/](http://www.cs.berkeley.edu/~daw/) David Wagner, collabora con Schneier, ha messo su web molti lavori.  
Su Quantum cryptography si veda [http://www-dse.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise\\_97/index.html](http://www-dse.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_97/index.html) e i lavori di Gilles Brassard  
<http://www.cs.hut.fi/ssh/crypto>  
<http://www.ifi.uio.no/pgp>

### Protocolli crittografici

[www.rsa.com](http://www.rsa.com) per le PKCS (Public-Key Cryptography Standards) Certification Authorities, PKI (Public Key Infrastructure), etc.  
[www.entrust.com/library.htm](http://www.entrust.com/library.htm) (contiene white paper sia sul prodotto specifico sia di carattere generale sulla gestione della fiducia in Internet; contiene anche tutti gli IETF draft relativi alle PKI)  
[www.public-key.com](http://www.public-key.com)  
<http://www.valicert.com/>  
[www.xcert.com](http://www.xcert.com) Esempio di CA  
[www.steinroe.com](http://www.steinroe.com) Esempio di CA