

Università degli Studi di Roma Tor Vergata

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica

Titolo della tesi

Candidato:

Matteo Fanfarillo

Matricola 0316179

Relatore:

Giuseppe Bianchi

Correlatore:

Francesco Gringoli

[Citazione]

Indice

1	Introduzione	6
1.1	Panoramica sulla eSIM	6
1.2	Obiettivo del lavoro	6
1.3	Definizioni preliminari	6
1.4	Panoramica sui capitoli successivi	6
2	Interfacce e funzionamento dell'eSIM	8
2.1	Architettura di RSP	8
2.1.1	Interfacce presenti nell'architettura di RSP	11
2.2	Architettura dell'eUICC	12
2.2.1	Caratteristiche hardware e software dell'eUICC	13
2.3	Interazione tra eUICC, LPA, SM-DP+ e operatore	13
2.3.1	Sicurezza TLS	13
2.3.2	Dettagli sull'interazione in RSP	14
3	Sicurezza dell'eSIM a run-time	17
4	Sicurezza dell'eSIM a boot-time	18
4.1	Funzionamento del boot dell'eSIM	18
4.2	Potenziati vulnerabilità	18
4.3	Prove sperimentali	18
5	Conclusione	19

Elenco delle figure

2.1	Comunicazione tra end user e operatore nel contesto del Remote SIM Provisioning.	9
2.2	Architettura di RSP nel caso di LPA non embeddato nell'eUICC.	9
2.3	Architettura di RSP nel caso di LPA embeddato nell'eUICC.	10
2.4	Architettura dell'eUICC.	12
2.5	Approccio default server per le fasi di profile ordering e download initialization. . .	14
2.6	Approccio activation code per le fasi di profile ordering e download initialization. .	15
2.7	Fase di common handshake.	15
2.8	Fase di profile download.	16

Elenco delle tabelle

2.1	Interfacce in RSP	11
-----	-----------------------------	----

Introduzione

1.1 Panoramica sulla eSIM

La eSIM (embedded-SIM) non è altro che una SIM virtuale: grazie a lei, quando l'utente vuole cambiare operatore, non deve più acquistare fisicamente una nuova SIM card presso un negozio del nuovo operatore, bensì gli è sufficiente ricevere via e-mail un profilo, ossia una "SIM digitale" che può essere caricata subito sul telefono mediante la scansione di un QR code. Si tratta di una soluzione molto più pratica rispetto a recarsi fisicamente presso il negozio dell'operatore, tant'è vero che negli ultimi anni si sta diffondendo sempre di più: uno studio di Juniper Research stima che il numero di telefoni che utilizzano la connettività eSIM aumenterà dai 986 milioni attuali ai 3.5 miliardi entro il 2027 [1]. Per questi motivi, e poiché le informazioni associate alla comunicazione tra eSIM sono sensibili, è fondamentale garantire un livello di sicurezza sufficientemente elevato per il funzionamento dell'eSIM sia a run-time che a boot-time.

1.2 Obiettivo del lavoro

La presente trattazione si propone di effettuare un'analisi di sicurezza e delle vulnerabilità della eSIM e del suo funzionamento e, successivamente, di tentare di sfruttare, anche con delle attività di laboratorio, le eventuali vulnerabilità trovate.

1.3 Definizioni preliminari

- **eUICC (embedded Universal Integrated Circuit Card):** è un chip utilizzato all'interno dei telefoni all'interno del quale è embeddato il software dell'eSIM. È integrato direttamente nei dispositivi (i.e. non è rimovibile) ed è progettato per essere programmato a distanza. Può contenere uno o più profili eSIM.
- **SM-DP+ (Subscription Manager Data Preparation plus):** è un protocollo che rappresenta una tecnica di provisioning usata per configurare le eSIM in modo automatico e remoto. Rispetto alla versione base SM-DP, offre delle funzionalità aggiuntive come un sistema di crittografia più avanzato e un'architettura di rete più flessibile.
- **LPA (Local Profile Assistant):** è un'applicazione che vive nel telefono dell'utente ed è responsabile della gestione dei profili all'interno della rete mobile, incluse la creazione, l'aggiornamento e la cancellazione.

1.4 Panoramica sui capitoli successivi

Nel capitolo 2 verrà svolta una trattazione dettagliata sull'architettura e sulle interfacce dell'eSIM, con lo scopo di fornire al lettore gli strumenti per comprendere appieno le tematiche centrali del lavoro. Nel capitolo 3 verrà effettuata un'analisi della sicurezza dell'eSIM a run-time, mentre nel capitolo 4 si procederà con l'analisi della sicurezza dell'eSIM a boot-time (i.e. durante la

fase di configurazione). Infine, nel capitolo 5 verranno mostrati i risultati finali, verranno tratte delle conclusioni sul lavoro svolto e verrà fornita una panoramica sui possibili progetti futuri che potranno essere intrapresi a partire dai risultati ottenuti attraverso questo lavoro.

Interfacce e funzionamento dell'eSIM

2.1 Architettura di RSP

Per comprendere appieno come funziona e come si interfaccia l'eSIM all'interno dei dispositivi mobili, è necessario introdurre il protocollo RSP, anche perché la eSIM si colloca proprio all'interno dell'architettura di RSP.

RSP (Remote SIM Provisioning) è un protocollo utilizzato dal protocollo SM-DP+ per gestire la comunicazione tra il server SM-DP+ e la scheda eSIM del dispositivo mobile (i.e. l'eUICC). In particolare, definisce le operazioni di provisioning specifiche per la comunicazione dell'eUICC. Quest'ultimo comprende i dati sia dell'operatore che dell'utente che, nel caso delle SIM tradizionali, verrebbero appunto memorizzati su una SIM card fisica. Entrando più nel dettaglio sul funzionamento di RSP, l'end user che vuole ottenere un profilo eSIM offerto da un particolare operatore (nel quale viene definito un piano tariffario), deve pagare l'operatore affinché esso gli fornisca un codice QR. Dopodiché, deve effettuare la scansione di tale codice QR per avviare lo scaricamento (operazione di Download) e l'installazione (operazione di Install) del profilo eSIM: a questo punto, la connessione tra end user (col relativo profilo eSIM) e operatore è completata. Se in un secondo momento l'end user ha la necessità di ottenere e utilizzare un secondo profilo eSIM, gli è sufficiente ripetere i medesimi passaggi appena descritto, e questo secondo profilo può essere installato all'interno del medesimo eUICC che ospita già il primo profilo. Tale meccanismo è illustrato nella figura 2.1 tratta da [2].

Per quanto riguarda l'architettura interna di RSP nello specifico, esistono due soluzioni differenti [3].

1. **LPA embeddato nel dispositivo mobile ma non all'interno dell'eUICC (LPAd):** oltre alla comunicazione tra l'applicazione LPA e SM-DP+, si utilizzano delle apposite interfacce anche per la comunicazione tra l'eUICC e l'applicazione LPA, come mostrato nella figura 2.2 tratta da [3]. Di seguito è riportato un breve glossario che chiarisce il significato di alcuni componenti appartenenti all'architettura di RSP raffigurata in 2.2.

- **CI** = Certificate Issuer: è un'entità autorizzata a rilasciare certificati digitali.
- **EUM** = eUICC Manufacturer: è il fornitore delle eUICC e del software residente (e.g. firmware, sistema operativo); svolge anche il ruolo di certificate authority subordinata al CI e rilascia certificati all'eUICC [4].
- **LDSd** = Local Discovery Service (quando LPA non è nell'eUICC).
- **LPDd** = Local Profile Download (quando LPA non è nell'eUICC).
- **LUId** = Local User Interface (quando LPA non è nell'eUICC).
- **SM-DS** = Subscription Manager Discovery Server: è il componente che fornisce un mezzo a SM-DP+ per raggiungere l'eUICC senza dover sapere a quale rete il dispositivo è connesso.

2. **LPA embeddato all'interno dell'eUICC (LPAe):** sono necessarie solo delle interfacce tra l'eUICC e SM-DP+, come mostrato nella figura 2.3 tratta da [3]. Successivamente è

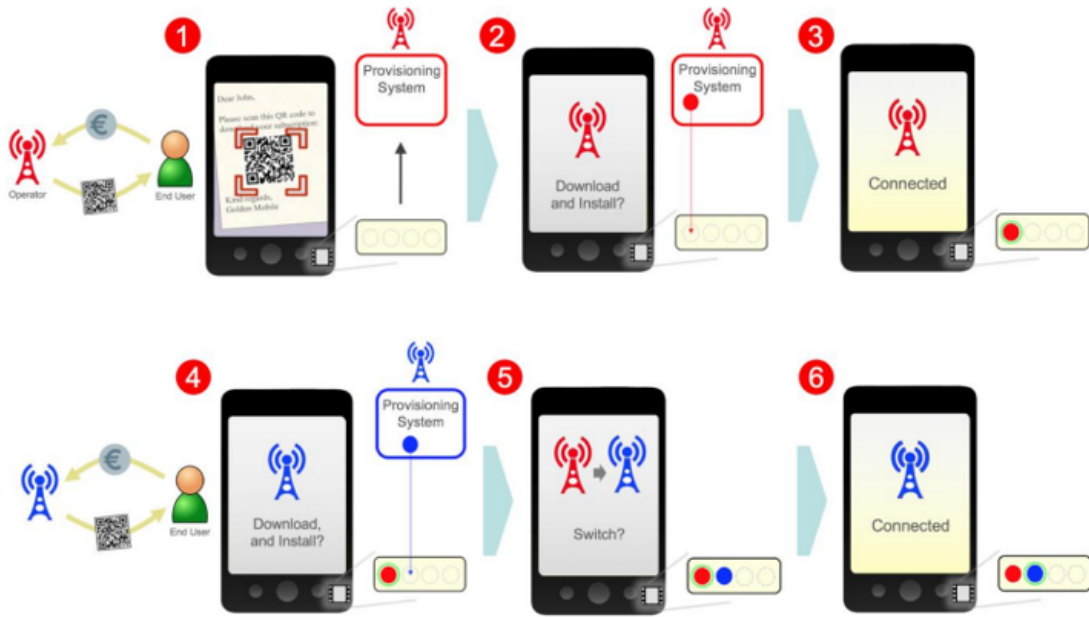


Figura 2.1: Comunicazione tra end user e operatore nel contesto del Remote SIM Provisioning.

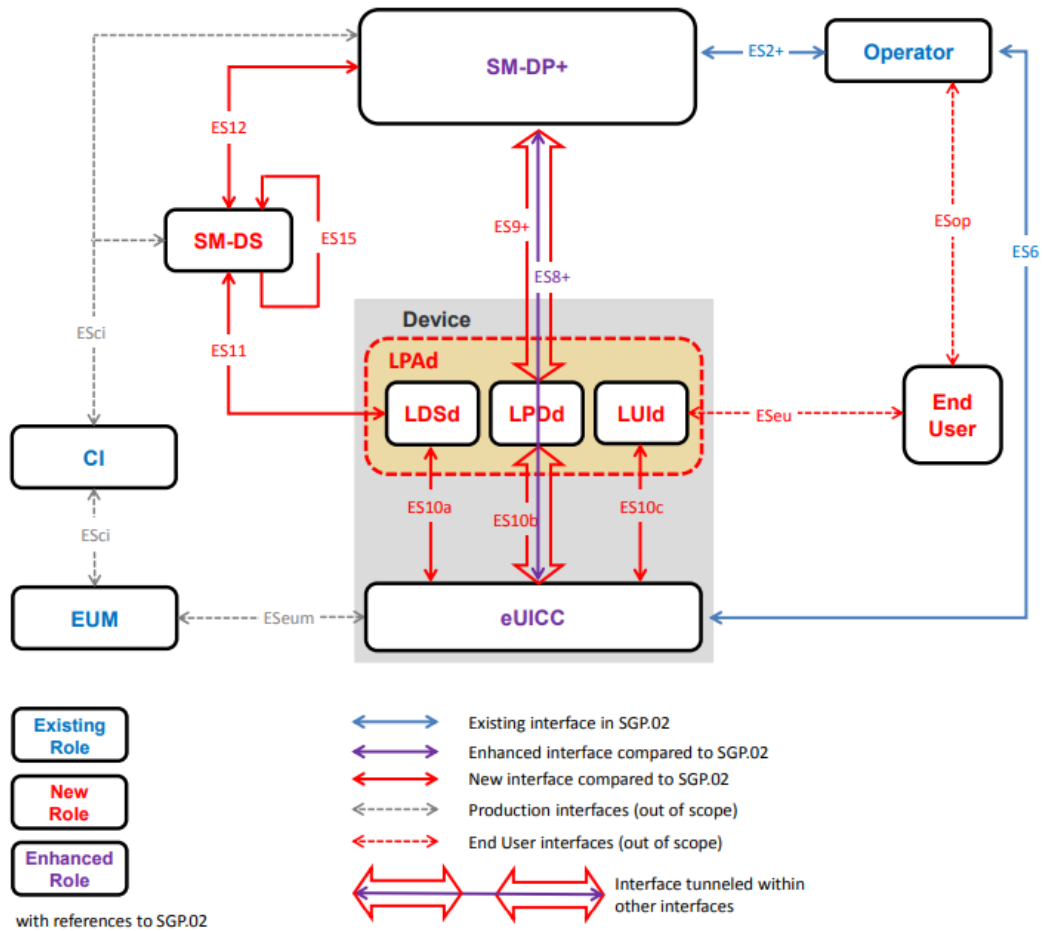


Figura 2.2: Architettura di RSP nel caso di LPA non embeddato nell'eUICC.

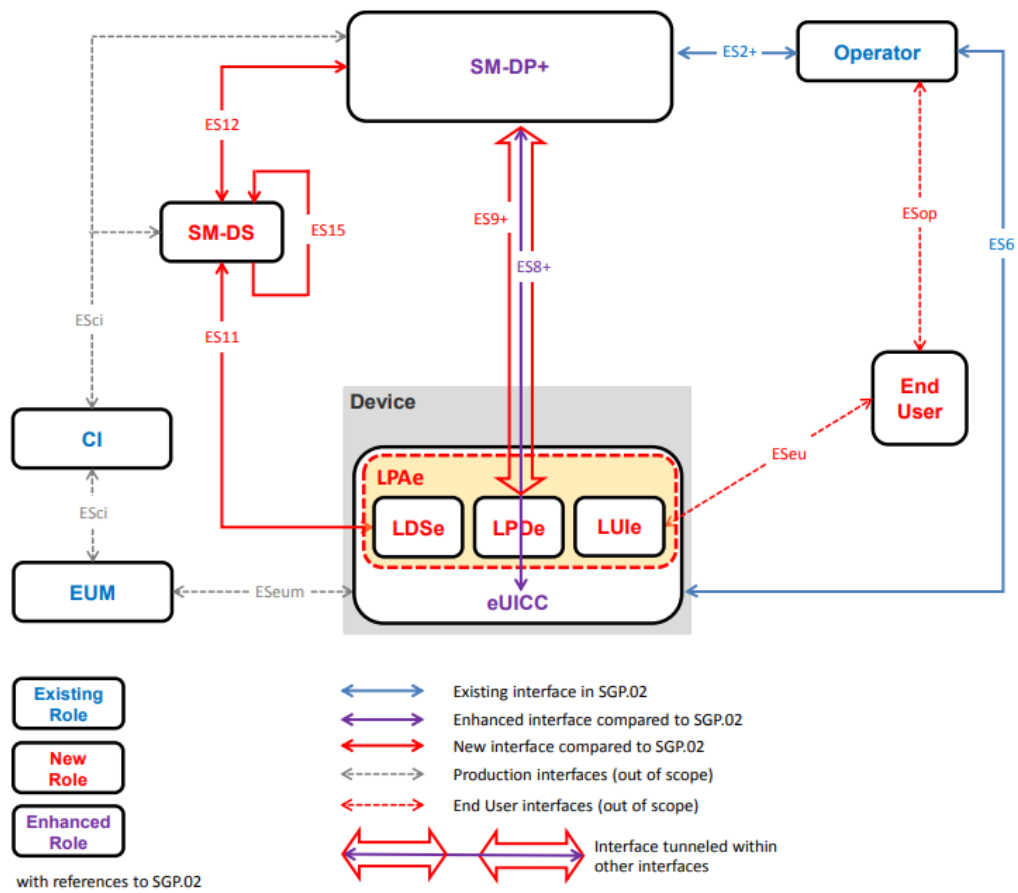


Figura 2.3: Architettura di RSP nel caso di LPA embeddato nell'eUICC.

riportato un breve glossario che chiarisce il significato di alcuni componenti appartenenti all'architettura di RSP raffigurata in 2.3.

- **LDSe** = Local Discovery Service (quando LPA è nell'eUICC).
- **LPDe** = Local Profile Download (quando LPA è nell'eUICC).
- **LUIe** = Local User Interface (quando LPA è nell'eUICC).

2.1.1 Interfacce presenti nell'architettura di RSP

Sono illustrate nella tabella 2.1, costruita a partire da informazioni tratte da [3].

Tabella 2.1: Interfacce in RSP

Interfaccia	Componente 1	Componente 2	Descrizione
ES2+	Operatore	SM-DP+	Viene usata dall'operatore per invocare la preparazione del Profile Package*.
ES6	Operatore	eUICC	Viene usata dall'operatore per gestire il contenuto dei profili.
ES8+	SM-DP+	eUICC	Fornisce un canale end-to-end sicuro tra SM-DP+ e l'eUICC per l'amministrazione dell'ISD-P** e del relativo profilo durante il download e l'installazione.
ES9+	SM-DP+	LPD	Viene usata per fornire trasporto sicuro tra SM-DP+ e LPD per la consegna del Profile Package.
ES10a	LDSd	eUICC	Viene usata da LPAd per ottenere gli indirizzi configurati dall'eUICC per Root SM-DS*** (gestione di una Discovery Request).
ES10b	LPDd	eUICC	Viene usata da LPAd per trasferire un Profile Package all'eUICC.
ES10c	LUId	eUICC	Viene usata da LPAd per la gestione locale dei profili installati sull'eUICC da parte dell'end user (e.g. Enable, Disable, Delete).
ES11	LDS	SM-DS	Viene usata per l'ottenimento di eventi.
ES12	SM-DP+	SM-DS	Viene usata per la gestione degli eventi.
ES15	SM-DS	SM-DS	Viene usata per connettere gli SM-DS tra loro nel caso in cui ce ne sia più di uno.
ESop	Operatore	End user	È specifica per le relazioni di business tra l'operatore e l'end user.
ESeu	End user	LUI	È specifica per le relazioni di business tra l'end user e la LUI.
ESeum	eUICC	EUM	È specifica per le relazioni di business tra l'eUICC e l'EUM.
ESci	CI	SM-DP+, SM-DS, EUM	Viene usata per richiedere certificati.

*Un Profile Package è un pacchetto di dati associato a un profilo che contiene le informazioni di configurazione necessarie per attivare e utilizzare quel profilo all'interno di una scheda eSIM. Esistono diversi tipi di Profile Package: l'Unprotected Profile Package (UPP) è un pacchetto di

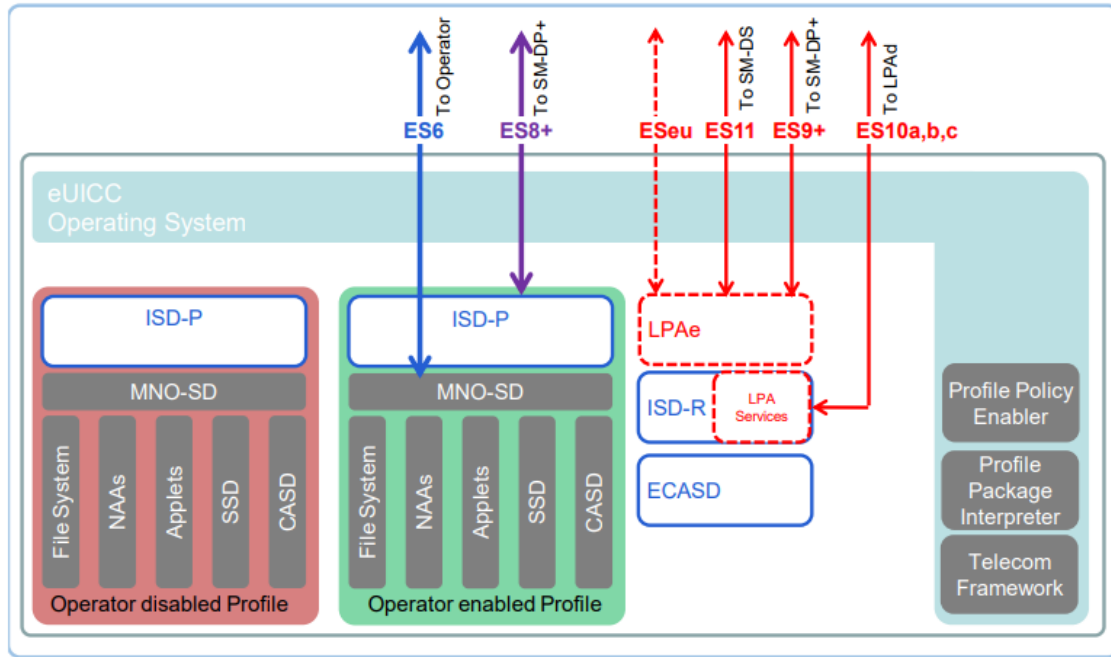


Figura 2.4: Architettura dell'eUICC.

dati non protetto da alcun meccanismo di sicurezza, come l'autenticazione o la crittografia; il Protected Profile Package (PPP) è un pacchetto di dati protetto da alcuni meccanismi di sicurezza; il Bound Profile Package (BPP) è un pacchetto di dati legato a un particolare dispositivo o a una piattaforma di servizi; il Segmented Bound Profile Package (SBPP), infine, non è altro che un BPP suddiviso in molteplici segmenti che possono essere utilizzati in modo indipendente e separato.

**ISD-P (Issuer Security Domain Profile) è un contenitore sicuro che ospita un unico profilo.

***Root SM-DS è il server primario utilizzato da un operatore di rete mobile per gestire le attivazioni e le disattivazioni delle sottoscrizioni e per gestire funzionalità come l'autenticazione e l'autorizzazione degli utenti. D'altra parte, si hanno gli Alternative SM-DS, che sono server di backup a cui si ricorre quando il Root SM-DS non è disponibile.

2.2 Architettura dell'eUICC

Nella figura 2.4 (tratta da [3]) è schematizzata l'architettura interna del chip eUICC, dove i riquadri e le frecce in rosso sono relativi rispettivamente ai componenti e alle interfacce che, nell'ambito dell'eUICC, sono presenti esclusivamente nel caso in cui l'applicazione LPA sia effettivamente embeddata all'interno dell'eUICC (LPAe).

Di seguito, invece, è riportato un breve glossario che chiarisce il significato di alcuni componenti appartenenti all'architettura dell'eUICC raffigurata in 2.4.

- **CASD** = Controller Authority Security Domain: è un'area di storage sicura all'interno dell'ISD-P in cui vengono memorizzate le credenziali richieste per supportare le funzionalità di sicurezza sensibili.
- **ECASD** = Embedded Controller Authority Security Domain: è il componente CASD direttamente incapsulato all'interno dell'eUICC.
- **ISD-R** = Issuer Security Domain Root: è il componente responsabile della creazione di nuovi ISD-P e della gestione del loro ciclo di vita.
- **LPA Services** = i seguenti quattro servizi: trasferimento del Bound Profile Package da LPAe all'ISD-P; ottenimento della lista dei profili installati; recupero dell'EID (eUICC ID); ottenimento delle operazioni di gestione del profilo locale (Local Profile Management Operations).

- **MNO-SD** = Mobile Network Operator Security Domain: è la parte del profilo posseduta dall'operatore che fornisce all'operatore Over The Air (OTA) un canale di comunicazione sicuro; viene usato per gestire il contenuto di un profilo una volta che è stato abilitato.
- **NAAs** = Network Access Applications: sono le applicazioni che consentono l'accesso alla rete.
- **Profile Package Interpreter** = servizio del sistema operativo dell'eUICC che traduce i dati del Profile Package in un profilo installato all'interno dell'ISD-P codificando usando il formato interno dell'eUICC.
- **Profile Policy Enabler** = componente che verifica che un il profilo eSIM possa essere installato sull'eUICC.
- **SSD** = Supplementary Security Domain: è un'area di memoria protetta all'interno dell'ISD-P che viene utilizzata per l'esecuzione di funzioni di sicurezza come le operazioni crittografiche. Di fatto, il suo scopo principale è quello di proteggere le informazioni riservate dell'utente (i.e. chiavi, password) da accessi non autorizzati e attacchi esterni.
- **Telecom Framework** = servizio del sistema operativo dell'eUICC che fornisce algoritmi di autenticazione di rete standardizzati alle applicazioni NAAs ospitate nei rispettivi ISD-P.

2.2.1 Caratteristiche hardware e software dell'eUICC

1. Deve essere resistente al tampering dei componenti hardware.
2. Supporta SHA-1.
3. Supporta TUAK, che è un particolare algoritmo crittografico di 3GPP, dove 3GPP (Third Generation Partnership Project) è il consorzio industriale che definisce gli standard per la tecnologia 5G.
4. Supporta Milenage, che è un set di funzioni 3GPP di autenticazione e di key generation.
5. Tutte le funzioni crittografiche devono essere resistenti al tampering e agli attacchi side-channel.

2.3 Interazione tra eUICC, LPA, SM-DP+ e operatore

2.3.1 Sicurezza TLS

Il protocollo TLS, la cui versione 1.2 è definita in RFC 5246 [5] e la cui versione 1.3 è definita in RFC 8446 [6], è utilizzato per proteggere il traffico sulle interfacce ES2+ (tra server SM-DP+ e operatore) e ES9+ (tra server SM-DP+ e LPA). In particolare, in ES2+ è prevista la mutua autenticazione tra le parti, mentre in ES9+ è prevista solo l'autenticazione del server. La documentazione di GSMA di riferimento [3] sottolinea l'obbligatorietà di fare uso di TLS v1.2 sia per gli algoritmi di autenticazione e autorizzazione, sia per l'integrità dei messaggi, sia per la confidenzialità. In realtà, documenti più recenti di GSMA [7] introducono la possibilità (e suggeriscono) di utilizzare TLS v1.3, che è la versione più recente di TLS e risolve le vulnerabilità che caratterizzano TLS v1.2, per cui, in linea di principio, dovrebbe risultare particolarmente difficoltoso da penetrare. Tuttavia, attualmente sembra essere solo un suggerimento, per cui nei capitoli successivi potrebbe essere necessario verificare a livello pratico qual è la versione di TLS utilizzata per proteggere la comunicazione tra LPA e server SM-DP+.

Un discorso analogo vale per l'interazione che si ha nella mutua autenticazione tra l'eUICC e il server SM-DP+, dove le due parti interagiscono tra loro tramite un TLS tunnel [4]. Per quanto invece riguarda la comunicazione tra eUICC e applicazione LPA, è richiesto l'utilizzo di un pairwise secure channel (ovvero di un canale di comunicazione sicuro rispetto alla confidenzialità e all'autenticazione dei messaggi) che collega le due parti all'interno del dispositivo mobile [4]. Tuttavia, non esiste una specifica universale che imponga l'utilizzo di un particolare protocollo di crittografia per proteggere il pairwise secure channel; il protocollo più utilizzato a tal proposito rimane TLS ma, di nuovo, potrebbe essere necessario stabilire con un approccio pratico se nel canale di comunicazione tra eUICC e LPA viene utilizzato TLS oppure un protocollo differente.

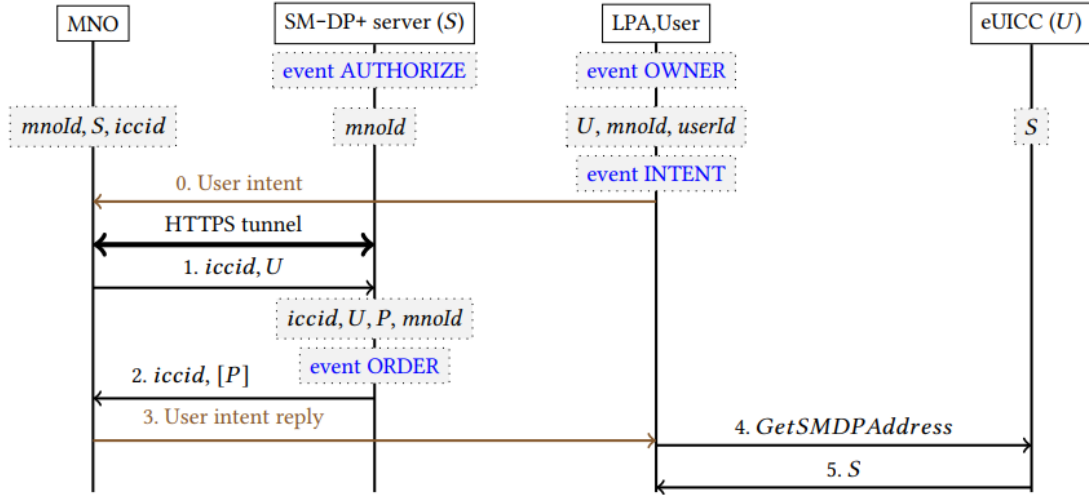


Figura 2.5: Approccio default server per le fasi di profile ordering e download initialization.

2.3.2 Dettagli sull'interazione in RSP

L'interazione tra le parti, nel contesto del protocollo RSP, avviene in quattro fasi distinte: profile ordering, download initialization, common handshake e profile download [4].

- **Profile ordering & download initialization:** nella prima fase, l'operatore richiede al server SM-DP+ di preparare un profilo eSIM, e il server gli restituisce dei download initialization pointer (che possono essere rappresentati ad esempio da un codice di attivazione). Nella seconda fase, invece, l'operatore consegna i download initialization pointer all'LPA in modo tale che poi sia possibile effettuare il download vero e proprio del profilo. Per questi primi due step, si possono seguire tre tipi di approcci differenti:

1. **Default server approach:** la figura 2.5 tratta da [4] mostra questo approccio. L'operatore (indicato con MNO - Mobile Network Operator) pre-condivide con l'eUICC il nome S del server domain. Quando vuole effettuare una nuova sottoscrizione e ottenere così un nuovo profilo, l'end user contatta l'operatore (messaggio 0), il quale ordina al server SM-DP+ il profilo per l'identificatore U dell'eUICC target (messaggio 1). Il server crea il nuovo profilo e lo invia all'operatore (messaggio 2), il quale notifica l'utente (messaggio 3). A tal punto, l'applicazione LPA viene avviata e, tramite un'operazione di get, recupera S dall'eUICC.
2. **Activation code approach:** la figura 2.6 tratta da [4] mostra questo secondo approccio. L'operatore ordina al server SM-DP+ dei profili (messaggio 1), e il server li rende disponibili con un codice di attivazione (tipicamente un codice QR) e li restituisce all'operatore (messaggio 2). Il codice di attivazione include il nome S del server domain, l'identificatore I_{ac} del profilo e, opzionalmente, l'OID, ovvero l'identificatore del server SM-DP+. Quando l'end user vuole effettuare una nuova sottoscrizione e ottenere così un nuovo profilo, contatta l'operatore (messaggio 0, che può essere inviato sia prima che dopo l'interazione tra operatore e SM-DP+ server appena descritta), il quale restituisce il codice di attivazione opportuno (messaggio 3).
3. **SM-DS assisted approach:** è un approccio analogo all'activation code, con la differenza che SM-DP+ si appoggia sui server SM-DS per comunicare con l'eUICC.

- **Common handshake:**
- **Profile download:**

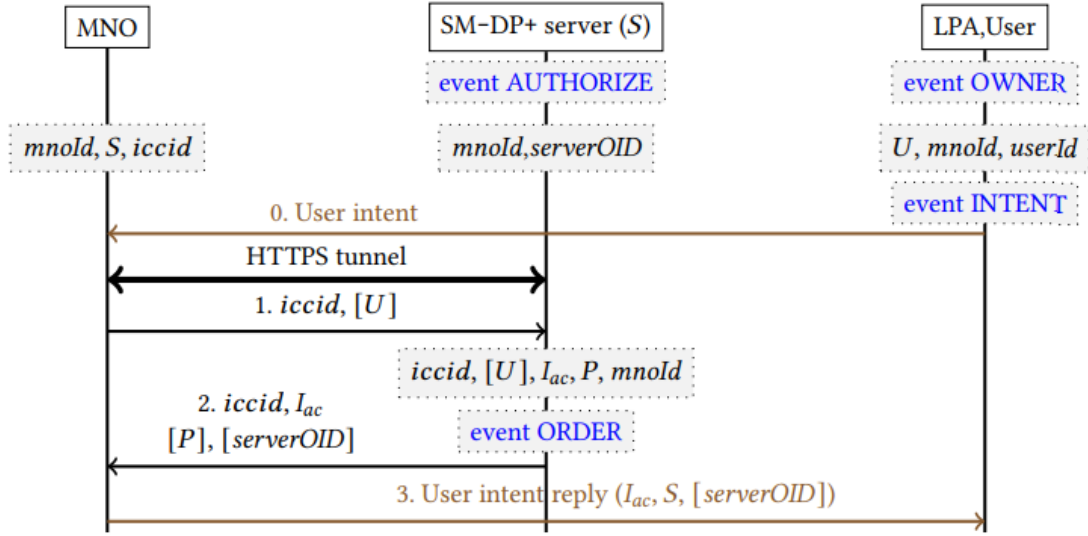


Figura 2.6: Approccio activation code per le fasi di profile ordering e download initialization.

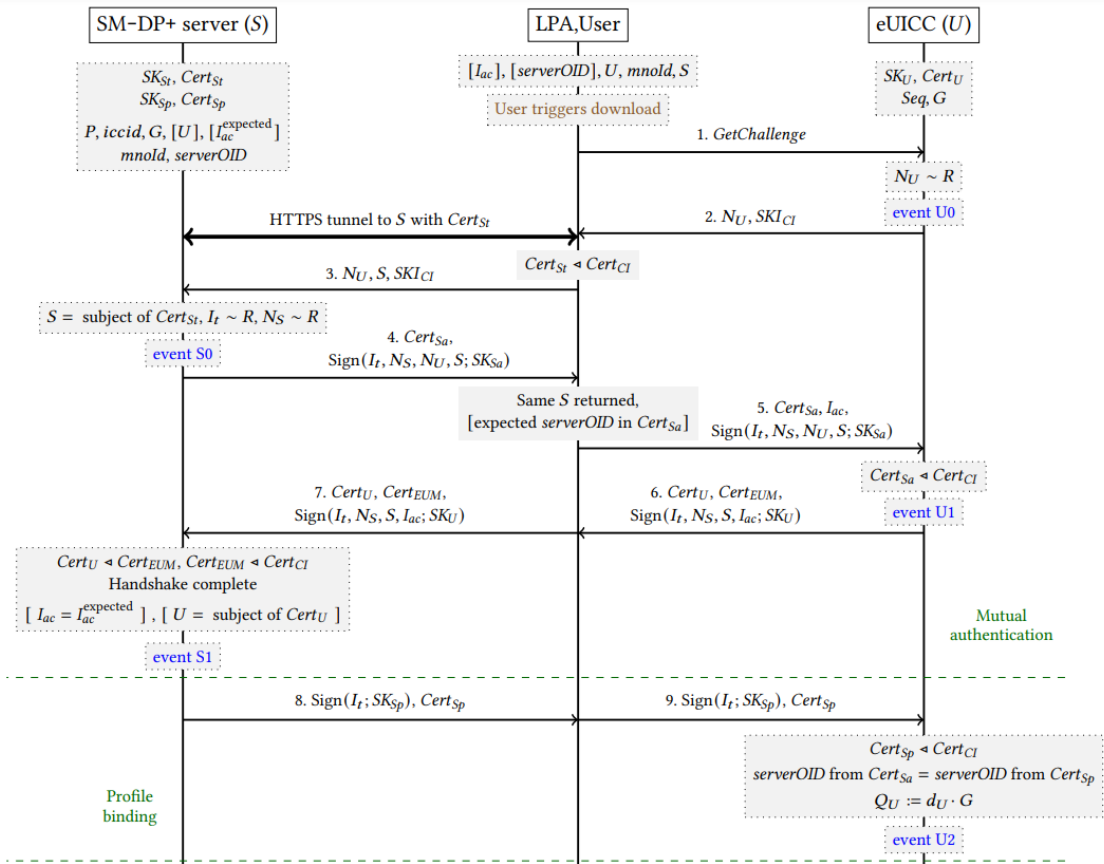


Figura 2.7: Fase di common handshake.

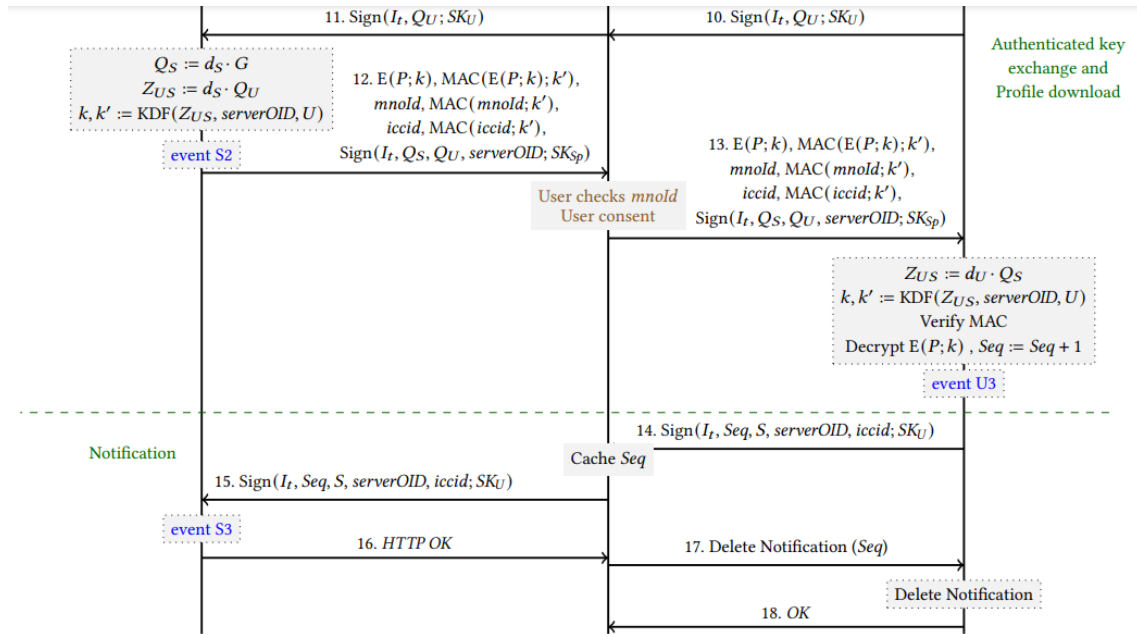


Figura 2.8: Fase di profile download.

Capitolo 3

Sicurezza dell'eSIM a run-time

[TODO]

Capitolo 4

Sicurezza dell'eSIM a boot-time

4.1 Funzionamento del boot dell'eSIM

[TODO]

4.2 Potenziali vulnerabilità

[TODO]

4.3 Prove sperimentali

[TODO]

Capitolo 5

Conclusione

[TODO] [8]

Bibliografia

- [1] Corcom. "Telefonia mobile, cosa sono le eSim? E perché sono più sicure?", 2023. <https://corrierecomunicazioni.it/telco/telefonia-mobile-cosa-sono-le-esim-e-perche-sono-piu-sicure/>.
- [2] GSM Association. "The what and how of Remote SIM Provisioning", 2018. <https://gsma.com/esim/wp-content/uploads/2018/12/esim-whitepaper.pdf>.
- [3] GSM Association. "RSP Technical Specification Version 2.0", 2016. https://gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/SGP.22_v2.0.pdf.
- [4] Abu Shohel Ahmed, Aleksi Peltonen, Mohit Sethi, and Tuomas Aura. "Security Analysis of the Consumer Remote SIM Provisioning Protocol", 2022. <https://arxiv.org/pdf/2211.15323.pdf>.
- [5] IETF. "The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.2", 2008. <https://rfc-editor.org/rfc/rfc5246>.
- [6] IETF. "The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3", 2018. <https://rfc-editor.org/rfc/rfc8446>.
- [7] GSM Association. "RSP Technical Specification Version 3.0", 2022. <https://gsma.com/esim/wp-content/uploads/2022/10/SGP.22-v3.0-1.pdf>.
- [8] Team di Android. "Implementing eSIM", 2023. <https://source.android.com/docs/core/connect/esim-overview>.

Ringraziamenti

[TODO]