Aionda Mail Security Whitepaper

Zero-Knowledge · Post-Quantum · Made in Germany

Version 1.10 — 2026-11-08

Aionda GmbH
Stuttgart, Germany

contact-46epp9ba@contact.aionda.com
https://mail.aionda.com

PUBLIC DOCUMENT

Contents

1. Sumário executivo . . . 3
2. Modelo de ameaças . . . 3
3. Visão geral da arquitetura . . . 5
4. Autenticação Zero-Knowledge (OPAQUE) . . . 7
5. Chave mestra do cofre & Shamir Secret Sharing . . . 9
6. KEM híbrida pós-quântica . . . 10
7. Pipeline de criptografia de e-mail . . . 11
8. Camada de transporte API criptografada . . . 14
9. Criptografia do compartilhamento de pastas . . . 15
10. Vault Drive — Armazenamento de documentos criptografado . . . 16
11. Aionda Chat — Mensagens E2EE pós-quânticas . . . 22
12. Chamadas de vídeo Aionda — Videoconferência E2EE pós-quântica . . . 28
13. Tarefas Aionda - Gerenciamento de tarefas criptografado de ponta a ponta . . . 32
14. Proteções contra canais laterais . . . 35
15. Gerenciamento e ciclo de vida das chaves . . . 36
16. Mecanismo de recuperação . . . 37
17. Autenticação sem senha (Passkeys) . . . 38
18. Guardian: Proteção MITM & assinatura de respostas . . . 38
19. Arquivo empresarial de e-mail (Blockchain) . . . 42
20. O que o servidor vê — e o que não vê . . . 45
21. Referência de algoritmos . . . 47
22. Comparação com outros fornecedores . . . 48
23. Limitações & fronteiras honestas . . . 49
24. Roteiro . . . 50
25. Entrar em um dispositivo por QR code . . . 50
26. Cliente MCP de código aberto: o protocolo, verificável . . . 52
Histórico do documento . . . 53
Contato . . . 55

1. Sumário executivo

A Aionda Mail é um serviço de e-mail criptografado zero-knowledge e pós-quântico, operado pela Aionda GmbH em Estugarda, Alemanha. O serviço combina endereços de e-mail descartáveis (DEAs) com uma caixa de correio totalmente criptografada — uma combinação que nenhum outro fornecedor oferece.

Propriedades centrais de segurança:

- **Arquitetura Zero-Knowledge:** A descriptografia do conteúdo armazenado na caixa de correio ocorre no dispositivo do usuário, no navegador ou no aplicativo nativo.
- **Segurança pós-quântica:** O Hybrid Key Encapsulation Mechanism (X25519 + ML-KEM-1024) protege todos os dados contra ataques clássicos e contra ataques de computadores quânticos.
- **Cliente MCP de código aberto (Apache-2.0):** O protocolo e todos os formatos de dados estão documentados publicamente e são verificáveis por meio do cliente MCP de código aberto, incluindo a criptografia de ponta a ponta pós-quântica (capítulo 26).
- **Autenticação Zero-Knowledge:** O protocolo OPAQUE (RFC 9807) garante que as senhas nunca são transmitidas ao servidor nem aí armazenadas — nem sequer como hashes.
- **Shamir Secret Sharing (2 em 3):** A chave mestra do cofre é dividida em três partes protegidas por senha, passkey e chave de recuperação. Quaisquer duas partes reconstroem a chave mestra.
- **Perfect Forward Secrecy:** Cada pedido à API utiliza um par de chaves criptográficas único e descartável. Comprometer um pedido não afeta nenhum outro.
- **Proteção MITM (Guardian):** A extensão de navegador verifica de forma independente todas as respostas do servidor via assinaturas Ed25519 e deteta ataques man-in-the-middle através da verificação do certificado TLS — mesmo contra proxies empresariais e CDNs comprometidas.
- **Arquivo de e-mail conforme GoBD:** Contas Enterprise beneficiam de uma cadeia de hash anti-falsificação (blockchain SHA3-256) com conteúdo criptografado de ponta a ponta (Hybrid KEM), trilho de auditoria completo, retenção legal e prazos de retenção configuráveis — conforme à regulamentação alemã GoBD.
- **Sem recuperação de senha:** Se a senha e todos os métodos de recuperação forem perdidos, os dados ficam irrecuperáveis. Isto é intencional — prova que o servidor não consegue aceder aos dados do usuário.

Jurisdição: Direito alemão (DSGVO/GDPR), sem compartilhamento de dados com serviços de informação estrangeiros.

---

2. Modelo de ameaças

2.1 Aquilo contra que a Aionda Mail protege

Ameaça	Proteção
Comprometimento do servidor (fuga de base de dados, acesso interno)	Todo o conteúdo de e-mail criptografado com chaves que o servidor nunca possui
Espionagem de rede (ISP, Wi-Fi, CDN)	Transporte API criptografado de ponta a ponta via Hybrid KEM

Ameaça	Proteção
Inspeção CloudFlare	Os pedidos à API são criptografados antes de sair do navegador; a CloudFlare vê apenas ciphertext. A extensão Guardian deteta adulteração de respostas via assinaturas Ed25519
Proxies MITM corporativos (ZScaler, Fortinet, etc.)	A extensão Guardian deteta certificados de proxy via lista de bloqueio de emissores (Firefox)
Ataques de computadores quânticos ("recolher agora, descriptografar depois")	ML-KEM-1024 (NIST FIPS 203) oferece resistência pós-quântica
Roubo da base de dados de senhas	O OPAQUE armazena apenas registos criptográficos, não hashes de senhas
Ataques de força bruta offline a senhas	O OPAQUE impede ataques offline; o rate limiting do lado do servidor impede ataques online
Análise de tamanho de e-mail	O bucket padding oculta os tamanhos reais dos e-mails
Canais auxiliares de compressão (CRIME/BREACH)	Bucket padding aplicado após a compressão
Enumeração de usuários	Respostas falsas determinísticas para contas inexistentes

2.2 Aquilo contra que a Aionda Mail NÃO protege

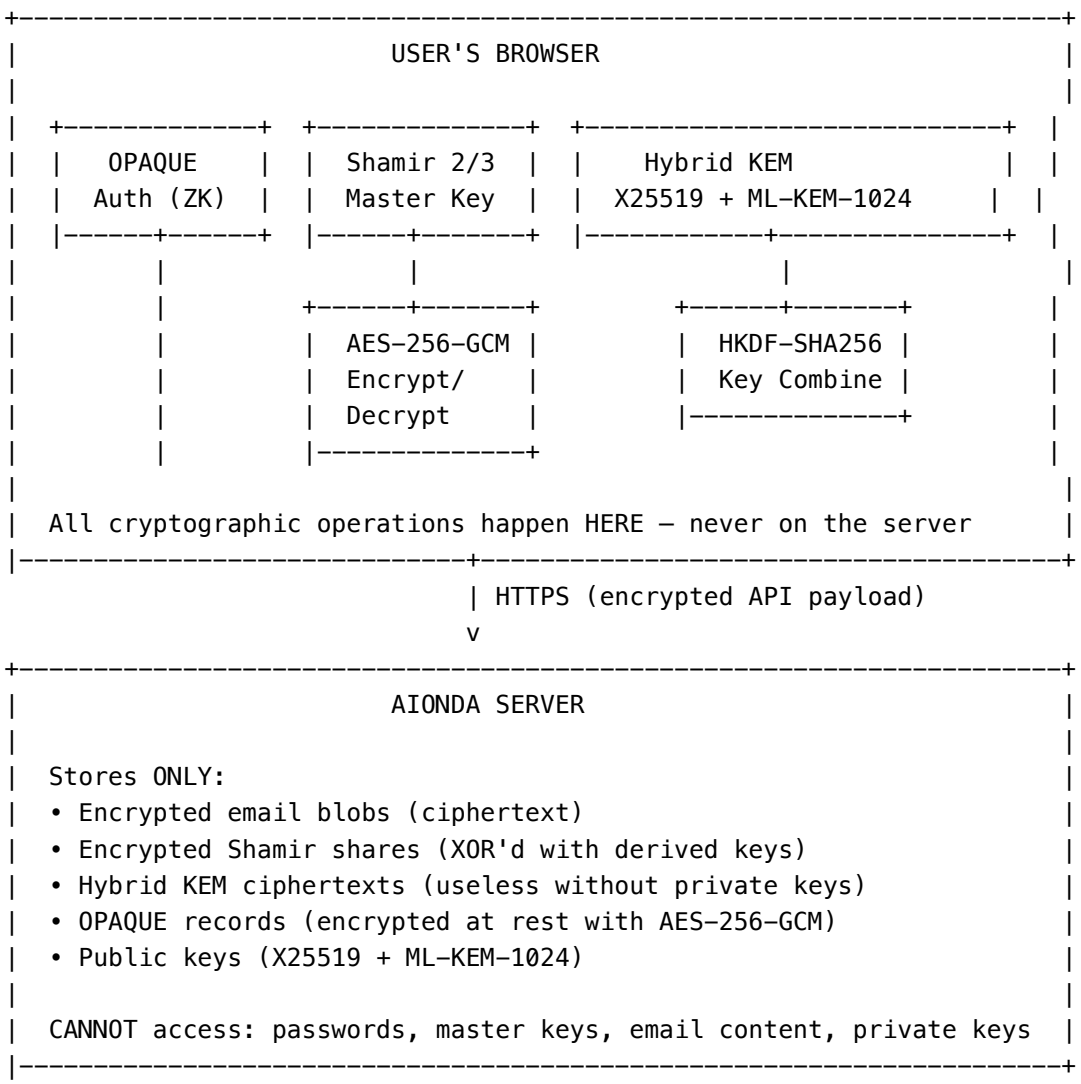
Limitação	Explicação
Dispositivo comprometido	Se o malware controlar o navegador, pode ler o conteúdo já decifrado
Metadados para destinatários externos	E-mails para Gmail/Outlook circulam em claro depois de saírem dos nossos servidores (a menos que se use PGP)
Metadados de e-mail nos nossos servidores	Timestamps, endereços IP e tamanhos de e-mails criptografados são visíveis para o servidor
Confiança na entrega web	O navegador transfere JavaScript dos nossos servidores em cada visita (ver Secção 20 para mitigações)
Criptoanálise sob coação física	Nenhum sistema criptográfico protege contra coerção física

2.3 Princípio de design

A Aionda Mail segue o **modelo do "servidor honesto"**: o sistema é concebido para que mesmo um servidor totalmente comprometido — ou um operador malicioso — não consiga descriptografar os dados do usuário. A segurança não depende de confiar em nós. Depende de matemática.

---

3. Visão geral da arquitetura



3.1 Visão geral dos componentes

Componente	Função	Localização
OPAQUE (RFC 9807)	Autenticação de senha zero-knowledge	Cliente + Servidor
Shamir Secret Sharing	Proteção da chave mestra do cofre (limiar 2 em 3)	Apenas cliente
Hybrid KEM (X25519 + ML-KEM-1024)	Encapsulação de chave pós-quântica para e-mails	Cliente + Servidor
AES-256-GCM	Criptografia simétrica autenticada	Cliente + Servidor
HKDF-SHA256	Derivação de chave a partir de segredos partilhados híbridos	Cliente + Servidor
BIP39	Codificação da chave de recuperação (mnemónica de 24 palavras)	Apenas cliente

Componente	Função	Localização
WebAuthn PRF	Desbloqueio do cofre baseado em passkey	Apenas cliente
Bucket Padding	Proteção contra canais auxiliares	Cliente + Servidor

3.2 Clientes nativos para iOS e macOS

A Aionda Mail oferece aplicativos nativos para iOS (iPhone e iPad) e macOS. Ambos usam uma base de código Swift/SwiftUI compartilhada, com pontos de entrada e adaptações da interface específicos de cada plataforma. O pacote compartilhado `AiondaMailCore` implementa as funções centrais, enquanto `AiondaMailUI` fornece a interface SwiftUI.

A interface nativa é distribuída como parte do aplicativo instalado. Isso a diferencia do cliente de navegador, que carrega seu código de aplicativo pela web. As referências às APIs do navegador, a JavaScript e a sessionStorage neste documento descrevem a implementação web; não definem o armazenamento local nem o ambiente de execução dos clientes nativos.

Nativo não significa que todos os componentes dispensem tecnologias web: visualizações WebKit integradas exibem e-mails HTML, permitem redigi-los e fornecem a interface multimídia das videochamadas. A visualização de leitura HTML desativa o JavaScript do conteúdo e usa um armazenamento de dados de sites não persistente. Essas configurações de leitura não devem ser generalizadas para o editor nem para as visualizações de videochamada, que precisam de JavaScript.

A arquitetura nativa, por si só, não garante a segurança. Continua sendo necessário confiar no aplicativo instalado, nas suas atualizações e no sistema operacional; um dispositivo comprometido pode acessar o conteúdo descriptografado. A distribuição web continua fazendo parte do limite de confiança dos componentes integrados que carregam conteúdo web.

3.3 Cliente Android

O Aionda Mail para Android é um aplicativo nativo (Kotlin, Jetpack Compose). A criptografia fica em um núcleo comum em Rust, integrado via JNI: ML-KEM-1024 e X25519 para a KEM híbrida, AES-256-GCM, ML-DSA para assinaturas e OPAQUE (`opaque-ke`) para o login. Os esquemas e formatos de dados são os mesmos do aplicativo web, dos aplicativos Apple e do cliente MCP.

O aplicativo armazena segredos locais (por exemplo, material de sessão e de desbloqueio) apenas criptografados, com uma chave AES-256-GCM no Android Keystore e, em dispositivos com StrongBox, dentro do chip de segurança. Os e-mails HTML são exibidos em uma WebView sem JavaScript, sem armazenamento DOM, sem acesso a arquivos e conteúdos e sem acesso à rede; imagens remotas só são carregadas mediante pedido explícito, sem cookies e sem referer.

Distribuição: Google Play e um repositório F-Droid próprio (`https://aionda.com/fdroid/repo`) com uma variante sem serviços do Google, assinada com sua própria chave de publicação.

3.4 Todos os clientes em resumo

Cliente	Distribuição	Tecnologia	A criptografia roda	Código-fonte
Aplicativo web	Navegador, `mail.aionda.com`	TypeScript, carregado do servidor a cada acesso (seção 23.1)	no navegador	não aberto
iOS e iPadOS	App Store	Swift/SwiftUI, `AiondaMailCore` (seção 3.2)	no dispositivo	não aberto
macOS	Mac App Store	base de código compartilhada com o iOS (seção 3.2)	no dispositivo	não aberto
Android	Google Play, repositório F-Droid próprio	Kotlin/Jetpack Compose, núcleo criptográfico em Rust (seção 3.3)	no dispositivo	não aberto
Extensão de navegador	Chrome, Firefox; Safari como parte do aplicativo macOS	verificação Guardian no Chrome e no Firefox (capítulo 18), endereços descartáveis	na extensão	não aberto
Cliente MCP	npm, Node.js	TypeScript (capítulo 26)	no computador do usuário	**aberto, Apache-2.0**

Todos os clientes usam os mesmos esquemas e formatos de dados (capítulos 6 e 7). Um aplicativo para Windows (WinUI 3 com o mesmo núcleo em Rust do Android) está em desenvolvimento e ainda não foi lançado.

---

4. Autenticação Zero-Knowledge (OPAQUE)

4.1 Porque não hash de senhas?

Os serviços tradicionais armazenam hashes de senhas (bcrypt, Argon2). Embora melhor que texto em claro, esta abordagem tem fragilidades fundamentais:

- O servidor vê a senha durante o login (mesmo que apenas brevemente em RAM)
- Os hashes de senhas podem ser atacados por força bruta offline se a base de dados for roubada
- O servidor pode ser modificado para registar senhas

O OPAQUE elimina os três problemas. A senha nunca sai do navegador — nem em claro, nem como hash, nem em qualquer forma.

4.2 Como funciona o OPAQUE

O OPAQUE (RFC 9807) é um protocolo aPAKE (Asymmetric Password-Authenticated Key Exchange). Utiliza um mecanismo criptográfico de challenge-response onde o servidor consegue verificar que o usuário conhece a senha correta sem nunca saber qual é essa senha.

Registo (uma única vez):

```
Browser                                    Server
--------                                   ------
1. Generate OPAQUE registration     ->
   request from password
                                           2. Create OPAQUE registration
                                              response (blind evaluation)
                                    <-
3. Finalize registration            ->      4. Store encrypted OPAQUE
   (export_key available)                      record (AES-256-GCM at rest)
```

Login (em cada sessão):

```
Browser                                    Server
--------                                   ------
1. Generate login request (KE1)     ->      2. Look up encrypted OPAQUE record
   from password                              Decrypt with server key
                                              Generate response (KE2)
                                    <-
3. Verify server response
   Compute session key + KE3        ->      4. Verify KE3 (cryptographic proof)
   Password verified locally!                 If valid: session authenticated
                                              If invalid: reject (max 3 attempts)
```

Propriedades centrais:

- A senha é verificada **no lado do cliente** no passo 3 — o servidor nunca a vê
- O servidor armazena um **registo OPAQUE**, que não é um hash de senha e não pode ser atacado offline
- Os registos OPAQUE são ainda **criptografados em repouso** com AES-256-GCM usando uma chave do lado do servidor
- **Proteção contra enumeração de usuários**: Contas inexistentes recebem respostas falsas determinísticas com timing idêntico
- **Rate limiting**: Máximo 3 tentativas de autenticação por sessão, timeout de sessão de 120 segundos

4.3 Implementação

- **Biblioteca:** `@serenity-kit/opaque` (baseada em WASM, qualidade de produção)
- **Componente do servidor:** Microsserviço dedicado para operações criptográficas OPAQUE
- **Formato Base64:** base64url (URL-safe, sem padding) para compatibilidade do protocolo
- **Registo de auditoria:** Todos os eventos de autenticação são registados com timestamps e endereços IP

4.4 Migração SRP

Legacy accounts using SRP-6a are automatically migrated to OPAQUE upon next login. After migration, the SRP verifier is permanently deleted. Migration is one-way — accounts cannot revert to SRP.

---

5. Chave mestra do cofre & Shamir Secret Sharing

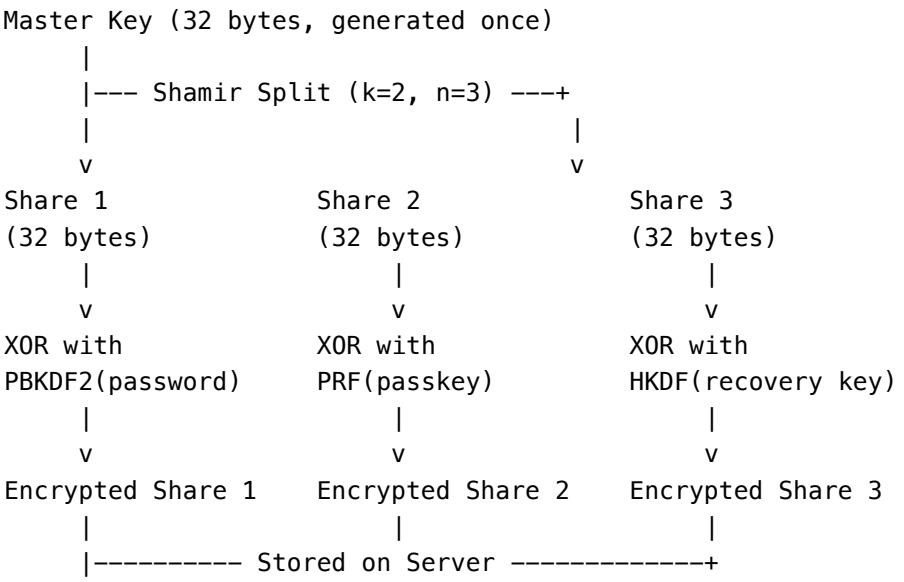
5.1 Geração da chave mestra

When a user activates the encrypted mailbox, a **256-bit (32-byte) master key** is generated using the browser's cryptographically secure random number generator (`crypto.getRandomValues`).

Esta chave mestra é a raiz de toda a criptografia. Nunca sai do navegador em claro. Nunca é armazenada em lado nenhum — nem no navegador, nem no servidor, nem em qualquer forma.

5.2 Shamir Secret Sharing (2 em 3)

A chave mestra é dividida em três partes usando o esquema **Shamir's Secret Sharing** sobre o corpo de Galois GF(2^8) com o polinómio irredutível do AES (x^8 + x^4 + x^3 + x + 1).



Threshold property: Any 2 of the 3 shares are sufficient to reconstruct the master key via Lagrange interpolation. The server stores only the encrypted shares — and cannot decrypt any of them.

5.3 Proteção das partes

Cada parte é combinada (XOR) com uma chave derivada de um factor de autenticação diferente:

Share	Protected By	Key Derivation
Share 1	Password	PBKDF2-SHA256, 600,000 iterations, 32-byte random salt
Share 2	Passkey (FIDO2)	WebAuthn PRF extension, hardware-bound

Share	Protected By	Key Derivation
Share 3	Recovery Key	HKDF-SHA3-256 with account-bound salt

Reconstruction scenarios:

- **Normal login:** Password (Share 1) + Passkey (Share 2) -> Master Key
- **Lost passkey:** Password (Share 1) + Recovery Key (Share 3) -> Master Key
- **Password change:** Passkey (Share 2) + Recovery Key (Share 3) -> Master Key

5.4 Proteção do session storage

Even within a browser session, the master key is never stored in plaintext:

1. An ephemeral AES-256 key is generated
2. The master key is encrypted with this ephemeral key
3. Only the encrypted blob is placed in `sessionStorage`
4. The ephemeral key exists only in JavaScript memory (garbage-collected on tab close)

---

6. KEM híbrida pós-quântica

6.1 Porquê pós-quântico?

Quantum computers running Shor's algorithm could break classical public-key cryptography (RSA, ECDH, X25519) in polynomial time. While large-scale quantum computers do not yet exist, the threat of **"harvest now, decrypt later"** attacks is real: adversaries could store encrypted data today and decrypt it when quantum computers become available.

6.2 Abordagem híbrida

A Aionda Mail utiliza um **Hybrid Key Encapsulation Mechanism** que combina:

- **X25519** (Curve25519 ECDH) — proven classical security, 128-bit security level
- **ML-KEM-1024** (NIST FIPS 203, formerly Kyber-1024) — post-quantum security, NIST Security Level 5

A abordagem híbrida fornece **defesa em profundidade**: a chave combinada é segura desde que **pelo menos um** dos dois algoritmos permaneça intacto.

6.3 Processo de encapsulação

```
Sender (encrypting an email):

1. Generate ephemeral X25519 keypair
2. X25519 key agreement with recipient's public key
   -> x25519SharedSecret (32 bytes)

3. ML-KEM-1024 encapsulation with recipient's public key
   -> mlKemSharedSecret (32 bytes) + mlKemCiphertext (1568 bytes)

4. Combine secrets:
```

```
   combinedSecret = x25519SharedSecret || mlKemSharedSecret  (64 bytes)

5. Derive final key:
   sharedSecret = HKDF-SHA256(
       ikm = combinedSecret,
       salt = nil,
       info = "trashmail-hybrid-kem-v1",
       length = 32
   )

6. Use sharedSecret to wrap the email's ephemeral AES-256 key
```

6.4 Processo de decapsulação

```
Recipient (decrypting an email):

1. X25519 key agreement:
   x25519Shared = X25519(recipientPrivateKey, ephemeralPublicKey)

2. ML-KEM-1024 decapsulation:
   mlKemShared = ML-KEM-1024.Decapsulate(mlKemCiphertext, recipientPrivateKey)

3. Combine and derive (identical to sender):
   sharedSecret = HKDF-SHA256(x25519Shared || mlKemShared, "trashmail-hybrid-kem-v1")

4. Unwrap email's ephemeral AES-256 key using sharedSecret
5. Decrypt email content with ephemeral key
```

6.5 Tamanhos das chaves

Parameter	Size	Standard
X25519 public key	32 bytes	RFC 7748
X25519 private key	32 bytes	RFC 7748
ML-KEM-1024 public key	1,568 bytes	NIST FIPS 203
ML-KEM-1024 private key	3,168 bytes	NIST FIPS 203
ML-KEM-1024 ciphertext	1,568 bytes	NIST FIPS 203
Combined shared secret	32 bytes	HKDF-SHA256 output

6.6 Biblioteca

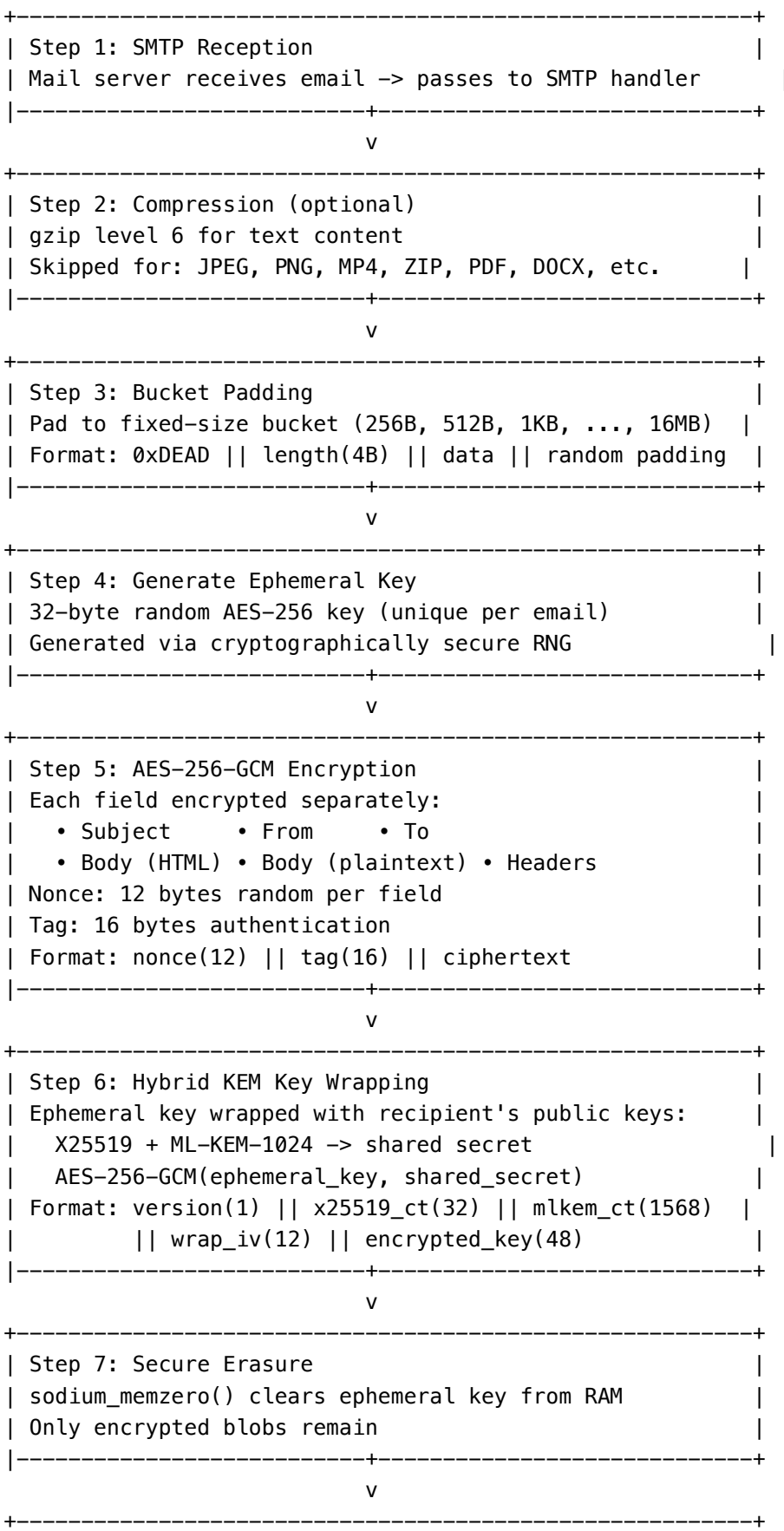
- **ML-KEM-1024:** `@noble/post-quantum` (audited, pure JavaScript implementation)
- **X25519:** WebCrypto API (`crypto.subtle.deriveBits`)
- **HKDF:** `@noble/hashes` (RFC 5869 compliant)

---

7. Pipeline de criptografia de e-mail

7.1 Incoming Email (SMTP -> Encrypted Storage)

Quando um e-mail chega ao servidor SMTP da Aionda Mail:


Step 1: SMTP Reception
Mail server receives email -> passes to SMTP handler
Step 2: Compression (optional)
gzip level 6 for text content
Skipped for: JPEG, PNG, MP4, ZIP, PDF, DOCX, etc.
Step 3: Bucket Padding
Pad to fixed-size bucket (256B, 512B, 1KB, ..., 16MB)
Format: 0xDEAD || length(4B) || data || random padding
Step 4: Generate Ephemeral Key
32-byte random AES-256 key (unique per email)
Generated via cryptographically secure RNG
Step 5: AES-256-GCM Encryption
Each field encrypted separately:
• Subject • From • To
• Body (HTML) • Body (plaintext) • Headers
Nonce: 12 bytes random per field
Tag: 16 bytes authentication
Format: nonce(12) || tag(16) || ciphertext
Step 6: Hybrid KEM Key Wrapping
Ephemeral key wrapped with recipient's public keys:
X25519 + ML-KEM-1024 -> shared secret
AES-256-GCM(ephemeral_key, shared_secret)
Format: version(1) || x25519_ct(32) || mlkem_ct(1568)
|| wrap_iv(12) || encrypted_key(48)
Step 7: Secure Erasure
sodium_memzero() clears ephemeral key from RAM
Only encrypted blobs remain

```
| Step 8: Database Storage                                  |
| Stored in vault_emails table:                             |
|   encrypted_subject, encrypted_from, encrypted_to,        |
|   encrypted_body, encrypted_body_text,                     |
|   encrypted_headers, wrapped_ephemeral_key                 |
| Threading: SHA-256 hashes of Message-ID/In-Reply-To       |
|            (not plaintext — zero-knowledge threading)      |
|-----------------------------------------------------------+
```

7.2 Leitura de e-mail (descriptografia no navegador)

O processo inverso acontece inteiramente no navegador:

1. Obter o e-mail criptografado do servidor via API criptografada
2. Analisar a chave efémera encapsulada (extrair ciphertext X25519 + ciphertext ML-KEM)
3. **Decapsulação Hybrid KEM** usando as chaves privadas do cofre -> segredo compartilhado
4. Desencapsular a chave efémera AES-256
5. **Descriptografia AES-256-GCM** de cada campo (assunto, de, para, corpo, cabeçalhos)
6. Reordenar bytes: formato do servidor (nonce || tag || ct) -> formato WebCrypto (nonce || ct || tag)
7. Remover bucket padding (detetar magic bytes 0xDEAD)
8. Descomprimir se for gzip (detetar magic bytes 0x1F8B)
9. Descodificar UTF-8 para texto em claro

7.3 Envio de e-mail

Ao redigir e enviar um e-mail:

1. O cliente criptografa o conteúdo do e-mail com um protocolo de challenge-response
2. O servidor recebe o payload criptografado, descriptografa-o efemeramente (apenas em memória), envia via SMTP
3. O servidor devolve os cabeçalhos MIME gerados ao cliente (criptografados)
4. O cliente criptografa uma cópia com a chave mestra do cofre e armazena na pasta Enviados
5. O texto em claro efémero do lado do servidor é imediatamente descartado — nunca escrito no disco

7.4 Anexos

Cada anexo é criptografado independentemente:

- Chave efémera AES-256 separada por anexo
- Encapsulação Hybrid KEM separada por anexo
- Nome do arquivo e tipo MIME criptografados separadamente
- Sem compressão para formatos já comprimidos (JPEG, ZIP, PDF, etc.)

7.5 Threading de e-mails (Zero-Knowledge)

O threading de e-mails (agrupar e-mails relacionados) usa apenas **hashes SHA-256** dos cabeçalhos Message-ID e In-Reply-To. O servidor nunca vê as strings reais dos Message-ID — pode agrupar e-mails por igualdade de hash sem conhecer o conteúdo.

---

8. Camada de transporte API criptografada

8.1 Problema

Mesmo com HTTPS, certos intermediários podem inspecionar tráfego:

- A **CloudFlare** (CDN/proteção DDoS) termina o TLS e pode ver pedidos em claro
- **Proxies empresariais** podem realizar inspeção TLS
- **Parâmetros de API** (como `?cmd=read_email&id=123`) revelam metadados

8.2 Solução: API criptografada de ponta a ponta

Toda a comunicação de API é adicionalmente criptografada de ponta a ponta entre o navegador e o servidor de aplicação, dentro do túnel HTTPS:

```
Browser                                    Server
--------                                   ------

Phase 1: Key Exchange (once per session)
----------------------------------------
GET /get_encryption_keys          ->        Return 20 pre-generated
                                           Hybrid KEM keypairs
                                  <-       {uuid, x25519_pub, mlkem_pub}

Phase 2: Encrypted Request (every API call)
-------------------------------------
1. Pick random keypair from cache
2. Hybrid KEM encapsulate -> shared secret
3. gzip compress request payload
4. Bucket-pad compressed data
5. AES-256-GCM encrypt with shared secret
6. Generate ephemeral response keypair
7. POST /e {                      ->        8.  Validate key ownership
     encrypted_payload,                    9.  Hybrid KEM decapsulate
     key_uuid,                             10. AES-256-GCM decrypt
     x25519_ciphertext,                    11. Decompress
     mlkem_ciphertext,                     12. Route to API controller
     response_x25519_pub,                  13. Execute business logic
     response_mlkem_pub                    14. Encrypt response with
   }                                           client's response keys
                                  <-       15. Return encrypted response
16. Hybrid KEM decapsulate response
17. AES-256-GCM decrypt
18. Decompress -> plaintext response
```

8.3 Propriedades centrais

- **One-time use:** Each API keypair is used exactly once, then permanently invalidated
- **Perfect Forward Secrecy:** Compromising one request key does not affect any other request

- **Session-bound:** Keys are claimed by a specific session and cannot be reused by another
- **Key pool:** Server maintains approximately 100,000 pre-generated keypairs
- **Auto-refetch:** Client automatically requests new keys when cache drops below 10
- **Key TTL:** Claimed keys expire after 24 hours
- **Bidirectional:** Both request AND response are encrypted — the server never returns plaintext

8.4 O que a CloudFlare vê

With this architecture, CloudFlare (or any TLS-terminating proxy) sees only:

- `POST /e` — a single, opaque endpoint
- A binary blob of encrypted data
- No API command names, no parameters, no email IDs, no user data

---

9. Criptografia do compartilhamento de pastas

9.1 Modelo de compartilhamento

Users can share encrypted folders with other Aionda Mail users. The sharing mechanism uses the Hybrid KEM to encrypt a folder-specific key for each recipient.

9.2 Fluxo de compartilhamento

```
Folder Owner                                          Recipient
------------                                          ---------

1. Derive folder key from master key:
   folderKey = HKDF-SHA256(masterKey, folderUuid)

2. Fetch recipient's public keys:
   recipient.x25519_pub (32 bytes)
   recipient.mlkem_pub (1568 bytes)

3. Hybrid KEM encapsulate:
   hybridEncapsulate(recipient.x25519_pub, recipient.mlkem_pub)
   -> {x25519Ciphertext, mlKemCiphertext, sharedSecret}

4. Encrypt folder key:
   wrappedKey = AES-256-GCM(folderKey, sharedSecret, nonce)

5. Store on server:
   {x25519_ct, mlkem_ct, nonce, wrappedKey, permissions}

                                                      6. Fetch sharing record from server

                                                      7. Hybrid KEM decapsulate:
                                                         hybridDecapsulate(x25519_ct, mlkem_ct,
                                                           own_x25519_priv, own_mlkem_priv)
                                                         -> sharedSecret
```

```
8. Decrypt folder key:
   folderKey = AES-GCM-decrypt(
     wrappedKey, sharedSecret, nonce)

9. Decrypt emails in folder using folderKe
```

9.3 Modelo de permissões

Permission	Capability
`readonly`	Read folder emails (decrypt only)
`einliefern`	Submit new emails into folder
`bearbeiten`	Edit folder contents
`antworten`	Reply to emails within folder
`vollzugriff`	Full access including ownership transfer

9.4 Cópia entre cofres (re-encapsulação)

When a recipient copies an email from a shared folder to their own vault, the email key must be **re-wrapped** for their own Hybrid KEM keypair. This is performed entirely client-side:

1. Decrypt shared folder key using recipient's private keys
2. Decrypt email's ephemeral key using folder key
3. Re-encapsulate ephemeral key with recipient's own public keys
4. Store re-wrapped copy in recipient's vault

O servidor facilita a transferência mas nunca vê material de chave em claro.

---

10. Vault Drive — Armazenamento de documentos criptografado

Vault Drive is the zero-knowledge document storage of Aionda Mail. Unlike emails, which use per-message ephemeral keys, Drive uses a **per-file-key architecture**: every document receives its own 32-byte AES-256-GCM key, generated client-side and wrapped with the master key.

10.1 Porquê chaves por arquivo?

A arquitetura de chave por arquivo oferece três vantagens fundamentais:

1. **Granular sharing:** Individual documents can be shared without exposing the master key. The server simply re-wraps the file key for the recipient — the content remains unchanged.
2. **Compromise isolation:** If a single file key is compromised (e.g. via a shared link), all other documents remain protected.
3. **Efficient sharing without re-encryption:** When sharing, the content does not need to be re-encrypted — all recipients read the same ciphertext with a re-wrapped key.

10.2 Fluxo de carregamento

```
Client                                          Server
```

```
------                                                    ------

1. Generate random file key:
   fileKey = randomBytes(32)

2. Encrypt content, name, MIME type:
   encContent = AES-256-GCM(content, fileKey, nonce1)
   encName    = AES-256-GCM(name,    fileKey, nonce2)
   encMime    = AES-256-GCM(mime,    fileKey, nonce3)

3. Wrap file key with master key:
   wrappedKey = AES-256-GCM(fileKey, masterKey, nonce4)

4. Send encrypted package:
   POST /e {
     encContent, encName, encMime,
     wrappedKey, wrappedKeyNonce
   }
                                                          5. Store in vault_files + vault_file_chunk
                                                             (pure ciphertexts, no key material)
```

10.3 Fluxo de transferência

```
1. Fetch chunk + wrapped_key from server
2. Unwrap file key:
   fileKey = AES-256-GCM-decrypt(wrappedKey, masterKey, nonce)
3. Decrypt content, name, MIME:
   content = AES-256-GCM-decrypt(encContent, fileKey, nonce1)
```

Decryption happens inside a **Web Worker** that holds the master key only temporarily in memory. After the operation, the memory is overwritten.

10.4 Partilha — apenas re-encapsulação de chave

A vantagem central das chaves por arquivo mostra-se na compartilhamento: o conteúdo **não** é re-criptografado. Apenas a chave de arquivo de 32 bytes é re-encapsulada usando a Hybrid KEM do destinatário.

```
Owner                                                     Recipient
-----                                                     ---------

1. Unwrap file key:
   fileKey = AES-GCM-decrypt(wrappedKey, masterKey)

2. Fetch recipient's public keys:
   recipient.x25519_pub, recipient.mlkem_pub

3. Hybrid KEM encapsulation:
   hybridEncapsulate(recipient.x25519_pub,
                     recipient.mlkem_pub)
   -> {x25519_ct, mlkem_ct, sharedSecret}
```

```
4. Wrap file key with sharedSecret:
   shareWrappedKey = AES-256-GCM(fileKey,
                                 sharedSecret, nonce)

5. Store share record:
   INSERT INTO vault_file_shares {
     file_uuid, recipient_account_id,
     x25519_ephemeral, mlkem_ciphertext,
     share_wrapped_key, permissions
   }
```

```
6. Fetch share record + chunk
7. Hybrid KEM decapsulation:
   hybridDecapsulate(x25519_ct, mlkem_ct,
     own_x25519_priv, own_mlkem_priv)
   -> sharedSecret
8. Unwrap file key:
   fileKey = AES-GCM-decrypt(
     shareWrappedKey, sharedSecret)
9. Decrypt SAME ciphertext:
   content = AES-GCM-decrypt(
     encContent, fileKey)
```

O proprietário não precisa da chave mestra do destinatário — apenas das chaves públicas Hybrid KEM, que o servidor armazena em claro.

10.5 Partilha de pastas (recursiva)

When a folder is shared, the client processes all contained documents and subfolders recursively. Each file receives its own share record containing the respective document's file key, re-wrapped for the recipient. The folder itself has no folder key — the structure is linked via parent UUIDs.

Important: The KEM encapsulation step is performed **per operation**, not per file. All files in a batched share use the same `sharedSecret` — making the operation efficient without reducing security (each file still has its own file key).

10.6 Modelo de permissões

Permission	Can perform
Read	Download, preview, read metadata
Full access	+ rename, upload new version, move inside the shared folder, upload new documents
Not possible	Delete (owner only), move out of shared folder (owner only)

Permissions are stored in the `vault_file_shares` record and enforced server-side. Cryptography protects the content — access control protects the operations.

10.7 Renomeação, sobrescrita e atualização de metadados

For shared documents, rename and overwrite operations are performed directly on the `vault_files` record — not on individual share records. All recipients immediately see the new name or content, as they reference the same ciphertext.

On **overwrite** (new version), a **new file key** is generated, the old ciphertext is replaced, and all existing share records are re-wrapped client-side with the new key. The owner must load the public keys of all recipients for this operation.

10.8 Pré-visualização e descriptografia em memória

Images, PDFs and other documents are decrypted **exclusively in memory** for preview. There is no disk cache with plaintext data. The client uses the **VaultDataLayer**, an encrypted IndexedDB cache that persistently stores ciphertexts and only decrypts them on demand.

Thumbnails are **never** generated server-side — the server never sees content. Thumbnails are generated client-side from the decrypted original and cached encrypted as well.

10.9 O que o servidor vê

Visible to server	Not visible
Encrypted content (random bytes)	Plaintext content
Encrypted filename (random bytes)	Plaintext filename
Encrypted MIME type (random bytes)	File type (image, PDF, text…)
File size (padded to bucket boundaries)	Actual original size
Upload timestamp	File key, master key
Owner account ID	Contents of subfolders
Parent folder UUID (for structure)	Folder names (also encrypted)
Share records with KEM ciphertexts	Recipient master key, unwrapped file key

10.10 Aplicação de quota

Quota enforcement happens server-side based on the **encrypted file size** (including bucket padding). The server does not know the actual plaintext size — the padding overhead is intentionally paid by the user to prevent size leakage.

Limits: - **Free:** 100 MB total storage, max. 10 MB per document - **Plus:** 5 GB total storage, max. 100 MB per document

10.11 Partilha externa — ligações públicas

Vault Drive documents can be shared with recipients who **do not have an Aionda Mail account** via public share links served from the isolated domain `mail.aionda.com`. The feature preserves zero-knowledge by treating each share as an **independent crypto envelope**, decoupled from the owner's vault master key.

Protection modes:

Mode	Trust factor	Use case
`link_only`	URL fragment (never sent to server)	Convenience — anyone with the link can access
`password`	Argon2id-derived key	Out-of-band password transfer (SMS, phone call)
`recipient_pubkey`	Hybrid KEM (X25519 + ML-KEM-1024)	Post-quantum secure when recipient has pre-registered public keys

10.11.1 Share creation (owner client)

```
1. fileKey := AES-GCM-decrypt(vault_files.wrapped_key, masterKey)
2. shareKey := randomBytes(32)                          // ephemeral, per share
3. wrappedFileKey := AES-GCM(fileKey, shareKey)         // new envelope
4. unlockVerifier := HMAC-SHA256(shareKey,
                     "unlock:" || shareUuid)            // proof-of-knowledge
5. If password protection:
     salt := randomBytes(16)
     pwKey := Argon2id(password, salt, t=3, m=64MB, p=1)
     wrappedShareKey := AES-GCM(shareKey, pwKey)
     -> Link: https://mail.aionda.com/s/<shareUuid>
   Else (link_only):
     -> Link: https://mail.aionda.com/s/<shareUuid>#<base64(shareKey)>
       (URL fragment — browsers never transmit fragments to the server)

6. Encrypted metadata (per-share, with shareKey):
     encFilename, encMime, encMessage  // all AES-GCM
7. POST /e  (encrypted API transport, see §8)
   -> server stores share record — never sees plaintext
```

Link delivery is user-chosen, not routed through Aionda Mail. After creation, the owner decides which channel transports the link: copy-to-clipboard, QR code, a pre-filled `mailto:` draft opened in the user's own mail client, Signal, SMS, AirDrop, or any other out-of-band channel. Aionda Mail never sees, sends, or logs the outgoing delivery — the server only learns which share-UUIDs exist. This matters for two reasons: (a) the owner can select the most trusted channel available to them (a corporate compliance policy, a preferred messenger, a verified face-to-face QR scan), and (b) for `password`-protected shares it enables **channel separation** — link via channel A, password via channel B — so a single compromised channel never grants access on its own.

10.11.2 Share access (recipient, no account required) The recipient visits `https://mail.aionda.com/s/<s`
The Share Page is a **separate bundle** from the Manager, with its own reproducible build, Subresource Integrity manifest, and a `/.well-known/integrity.json` endpoint for offline verification.

```
1. Share Page bootstrap (client generates ephemeral hybrid KEM keypair)
2. share_fetch_meta -> { wrapped_file_key, salt?, encrypted_message, ... }
3. Unlock phase — produces a one-time unlock_token:
     password mode:    server verifies Argon2id derivation -> unlock_token
```

```
     link_only mode:   client computes HMAC-SHA256(shareKey, "unlock:"||uuid)
                       server verifies against stored unlockVerifier
                       -> unlock_token
4. fileKey := AES-GCM-decrypt(wrappedFileKey, shareKey)
5. share_download_chunk (per chunk, unlock_token required)
6. Client hashes plaintext, calls share_confirm_download
```

The `unlock_token` unifies the flow across all three protection modes and enables centralized rate-limiting and audit-logging — link-only access requires proof of knowledge of the fragment, so bots and crawlers without the fragment cannot issue downloads.

10.11.3 Enforced policies Every share must declare the following at creation time (all enforced server-side):

- **`expires_at`** — mandatory, default 7 days, maximum 90 days
- **`max_downloads`** — mandatory counter, default 10
- **Rate limiting** — Argon2 attempts on password shares are throttled per IP hash and per share
- **`revoked_at`** — the owner can revoke any share with a single click; future unlock attempts and downloads return a unified "share unavailable" response (same error as expired or exhausted — no enumeration oracle)

10.11.4 Tamper-evident audit chain All relevant access events are appended to the existing `enterprise_audit_log` hash chain (SHA3-256, see §18.2). The following action types are reserved for external sharing:

`EXT_SHARE_CREATED`, `EXT_SHARE_EMAIL_SENT`, `EXT_SHARE_VIEWED`, `EXT_SHARE_UNLOCKED`, `EXT_SHARE_PREVIEWED`, `EXT_SHARE_DOWNLOAD_STARTED`, `EXT_SHARE_DOWNLOAD_CONFIRMED`, `EXT_SHARE_INTEGRITY_BROKEN`, `EXT_SHARE_PASSWORD_FAIL`, `EXT_SHARE_REVOKED`, `EXT_SHARE_ROTATED`, `EXT_SHARE_EXPIRED`.

IP and user-agent hashes use a **daily rotating salt** (`vault_drive_external_share_daily_salts`, pruned after 30 days) — historical hashes become non-reversible after salt rotation for GDPR compliance, while short-term correlation remains available for the owner.

10.11.5 Key rotation (share rewrap) The owner can rotate a share at any time without re-uploading the content:

```
1. new_shareKey := randomBytes(32)
2. new_wrappedFileKey := AES-GCM(fileKey, new_shareKey)
3. INSERT new share row; old.linked_to_uuid := new.share_uuid
4. old.revoked_at := NOW()
```

Recipients using the old link receive "share unavailable". The owner forwards the new link. All access events from both shares remain linked via `linked_to_uuid` in the audit chain.

10.11.6 What revocation does — and does not Revocation **stops future server-side delivery** of the share. It does **not** retroactively revoke share keys, file keys, or chunks already delivered. A recipient who has already downloaded the plaintext — or who captured the link fragment — can continue to use that material locally. For use cases with higher assurance requirements, combine: short `expires_at`, low `max_downloads`, password protection, and the Guardian browser extension for the recipient.

10.11.7 What the server sees

Visible to server	Not visible
`share_uuid`, `file_uuid`, `account_id` (owner)	Plaintext filename, MIME type, content, message
`wrapped_file_key`, `wrapped_share_key` (ciphertexts)	`share_key` (link-only: lives only in the URL fragment, client-side)
`unlock_verifier` (HMAC output, not reversible)	Password, Argon2-derived key
`protection_mode`, `expires_at`, `max_downloads`, `allow_preview`	Recipient identity (only salted IP/UA hash, pruned after 30 days)
`encrypted_filename`, `encrypted_mime`, `encrypted_message` (ciphertexts)	Their plaintexts
Plaintext `sender_display_name` (recipient sees it before unlock)	
Audit-chain entries for every access event	

---

11. Aionda Chat — Mensagens E2EE pós-quânticas

O Aionda Chat é a superfície integrada de mensagens em tempo real da Aionda Mail. Ao contrário do e-mail — que utiliza chaves efémeras de uso único por mensagem — as conversas de chat são de longa duração e requerem **forward secrecy** e **post-compromise security** para cada mensagem individual. Para isso projetámos um protocolo dedicado: **AAR (Aionda Async Ratchet)** — uma variante pós-quântica do X3DH + Double Ratchet do Signal, onde cada passo Diffie–Hellman é substituído por uma KEM híbrida (X25519 + ML-KEM-1024).

11.1 Porquê um protocolo dedicado?

O e-mail e o chat têm perfis de segurança fundamentalmente diferentes:

Property	Email	Chat
Cadence	Bursty (minutes/hours apart)	Real-time (seconds apart)
Session length	Single message	Continuous, days to years
Forward secrecy unit	Per message	Per message **within** a long session
Post-compromise recovery	Not required (one-shot key)	Required — each new message heals from past compromise
Asynchrony	High (recipient often offline)	High (recipient often offline)
Group dynamics	Static recipient list	Dynamic add/remove members

A chat conversation that simply re-used the email pipeline would either (a) burn a fresh ephemeral keypair every keystroke (unacceptably slow), or (b) share a single static conversation key (no

forward secrecy). Neither is acceptable. AAR resolves this by maintaining a continuously ratcheting key state per peer — every message advances the state irrevocably.

11.2 Blocos de construção

```
AAR uses exactly four primitives:

   Hybrid KEM         X25519 + ML-KEM-1024  (key encapsulation)
   AEAD               AES-256-GCM           (message encryption)
   KDF                HKDF-SHA256           (key derivation)
   Signatures         Ed25519               (identity-key binding, SPK signing)

No new cryptographic assumptions are introduced — every primitive is also
used elsewhere in the system and has been independently audited.
```

11.3 KeyBundle — o material de handshake assíncrono

Cada usuário publica um **KeyBundle** no servidor quando o chat é activado pela primeira vez. O bundle permite aos pares começar a enviar mensagens mesmo enquanto o usuário está offline.

```
KeyBundle (per account, hybrid throughout):

   Identity Key (IK)          — long-lived
      |-- IK.x25519_pub
      |-- IK.mlkem_pub
      |-- IK.ed25519_pub      — used to sign the SPK

   Signed Pre-Key (SPK)       — rotated weekly
      |-- SPK.x25519_pub
      |-- SPK.mlkem_pub
      |-- Ed25519 signature   — signs the concatenation, binds SPK to IK

   One-Time Pre-Keys (OPK)    — pool of ~100, consumed atomically
      |-- OPK.x25519_pub
      |-- OPK.mlkem_pub
```

Server storage: Only public halves of each key are stored, plus signatures and metadata. Private halves never leave the originating browser. The server enforces an atomic `UPDATE … LIMIT 1 SET consumed_ts = NOW()` when an OPK is fetched, guaranteeing single-use semantics under concurrent requests.

When the OPK pool falls below 20, the client tops up the pool with a fresh batch — this prevents the asynchronous handshake from degrading to a degenerate mode lacking one-time entropy.

11.4 Handshake estilo PQXDH (X3DH-PQ)

To start a new conversation with Bob, Alice fetches Bob's bundle (`IK_B`, `SPK_B`, one `OPK_B`) and Bob's Ed25519 signature on `SPK_B`. Alice verifies the signature, then performs four hybrid KEM encapsulations:

```
1. Verify Ed25519 signature on SPK_B    — binds SPK to long-term identity

2. Generate ephemeral Alice key (EK_A):
```

```
   EK_A.x25519, EK_A.mlkem  (one-time, discarded immediately after handshake)

3. Four hybrid KEM encapsulations:
   ss1 = HKEM(IK_A_priv  ⊗ SPK_B_pub)    — Alice identity -> Bob SPK
   ss2 = HKEM(EK_A_priv  ⊗ IK_B_pub)     — Alice ephemeral -> Bob identity
   ss3 = HKEM(EK_A_priv  ⊗ SPK_B_pub)    — Alice ephemeral -> Bob SPK
   ss4 = HKEM(EK_A_priv  ⊗ OPK_B_pub)    — Alice ephemeral -> Bob OPK

   (each ss_i is itself the HKDF combination of an X25519 secret
    AND an ML-KEM secret — see Section 6.4)

4. Root key derivation:
   SK = HKDF-SHA256(
          IKM  = ss1 || ss2 || ss3 || ss4,
          info = "AAR-X3DH-v1" || consumed_OPK_id
        )

5. Forget every private piece of ephemeral material; SK seeds the ratchet.
```

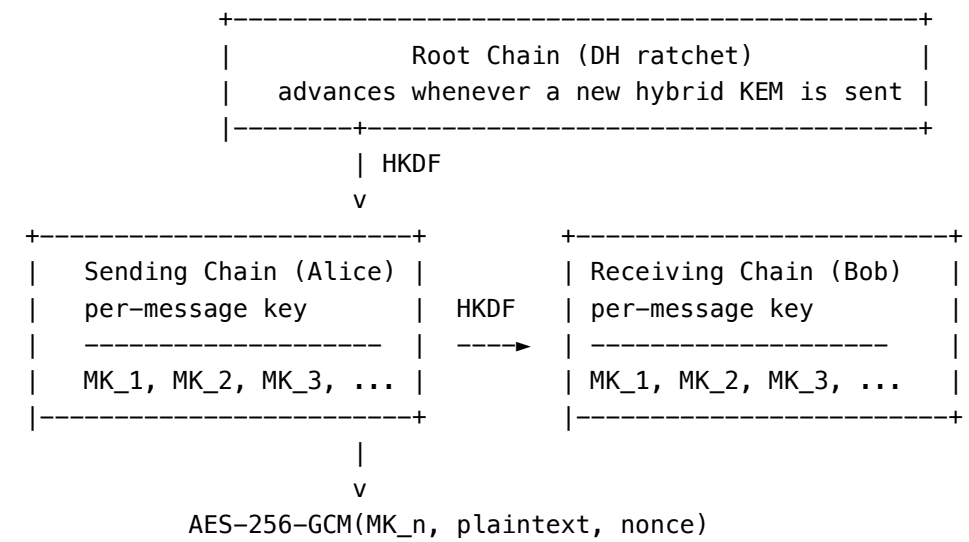
A construção garante:

- **Mutual authentication** via the Ed25519-signed `SPK_B` and `IK_A` binding
- **Forward secrecy** even if `IK_B` is later compromised — `ss3` and `ss4` use ephemeral keys on both sides
- **Post-quantum security** because every `ss_i` includes an ML-KEM term — an attacker harvesting today's traffic for a future quantum computer still cannot reconstruct any of the four secrets
- **Replay resistance** through atomic OPK consumption — Bob's server-side trigger refuses to release the same OPK twice

O OPK ID consumido pela Alice é ligado ao parâmetro `info` do HKDF — o lado do Bob só pode portanto reproduzir a mesma chave raiz com o mesmo OPK, e apenas uma vez.

11.5 Double Ratchet — chaves por mensagem

After the handshake, both sides advance a **Double Ratchet** state for every message:



Cada evento de chat transporta a **chave pública de ratchet** atual do remetente (par híbrido, ~1,6 KB). Quando o destinatário recebe uma mensagem cuja chave de ratchet difere da última vista, ambas as partes executam uma nova Hybrid KEM, derivam uma nova chave raiz e reiniciam as suas chains. Este é o **DH ratchet** na terminologia do Signal — exceto que cada passo é uma Hybrid KEM completa, e não um único Diffie–Hellman.

Per-message guarantees:

- **Forward secrecy:** Deletion of `MK_n` makes message `n` undecryptable, even given the full long-term state at the time of capture
- **Post-compromise security:** Once a fresh DH-ratchet step has occurred after a compromise, all subsequent messages are protected from the attacker
- **Out-of-order delivery:** Message keys are cached for late-arriving messages (capped at 1000 keys per session to bound memory)

11.6 Contentor de mensagem

Cada evento de chat carregado para o servidor é um ciphertext autocontido:

```
MessageContainer (base64-encoded, stored in chat_events.payload):

   +-------------------------------------------------------------+
   | ratchet_pub      :  Hybrid KEM public key (current step)    |
   | prev_chain_len   :  Number of messages in previous chain    |
   | msg_number       :  Counter within current chain            |
   | ciphertext       :  AES-256-GCM(MK_n, plaintext || header)  |
   | tag              :  AES-256-GCM authentication tag          |
   |-------------------------------------------------------------+

The header inside the AEAD plaintext contains: sender login string,
content_type (text/quote/file-reference), timestamp, optional
reply_to_event_uuid.
```

O contentor é opaco para o servidor — incluindo o tipo de mensagem, o formato do nome de visualização do remetente, e qualquer contexto de resposta citada. A base de dados da Aionda armazena o contentor tal qual em `chat_events.payload`.

11.7 Conversas em grupo — Sender Keys por destinatário

For room conversations (3+ participants), AAR uses a **per-recipient fan-out** model. The sender derives one sender-key chain per peer pair and encrypts a message once per recipient. Each recipient therefore receives a personally-addressed ciphertext, decryptable only with the keys derived from their own AAR session with the sender.

Trade-off: Fan-out cost is `O(N)` in recipients — acceptable for typical team sizes (≤25 participants). For larger groups a future MLS-based mode is planned (see Roadmap). The current model is preferable to a single shared group key because: (a) it preserves forward secrecy on a per-pair basis, (b) it does not require key-rotation on member removal beyond the bilateral level, and (c) it inherits the post-quantum guarantees of pairwise AAR without modification.

11.8 Contentor de conversa inicial

When Alice starts a new room with Bob, Carol, and Dan, the first message to each participant is wrapped as an **initial-handshake container** that carries (a) the X3DH handshake material

consumed against that participant's bundle and (b) the first message itself. The receiver dispatches on the discriminator field:

```
{
  "type": "initial",
  "initialMessage": { /* handshake metadata, OPK id consumed */ },
  "encryptedMessage": "<base64 MessageContainer>"
}
```

Subsequent messages in the same room reuse the established AAR session and only contain the `encryptedMessage` portion.

11.9 Transporte — API criptografada + Mercure SSE + WebSocket

O plano do chat utiliza três canais ortogonais:

Channel	Direction	Purpose	Plaintext seen by server
`/e` Encrypted API	Client -> Server	Send message, fetch history, key-bundle ops (11 endpoints)	None — all 11 chat endpoints use the same hybrid-KEM transport documented in Section 8
Mercure SSE	Server -> Client	Push delivery of new events (`chat.event_received`, `chat.read_receipt`)	None — the server pushes the same opaque MessageContainer it stored
WebSocket `/chat/ws`	Bi-directional	Reconnect backfill (`sync_request`), heartbeat, presence	Presence boolean (online/offline) and login-string only — never message content

Presence is held in an in-memory map on `aionda_chat_realtime`; a single intranet-only HTTP endpoint exposes a `login -> online` lookup for the team picker so users can see whether a peer is reachable. No history, no read state, no content ever traverses the presence channel.

11.10 Confirmações de leitura

As confirmações de leitura são uma definição opt-in por conta (`chat_participants.send_read_receipts`). Quando ativadas, marcar uma mensagem como lida publica um evento `chat.read_receipt` que contém:

`{ conversation_uuid, last_read_event_uuid, account_login }`

Note that `last_read_event_uuid` is **not** the message content — it is a server-allocated identifier already known to the server. No additional information leaks beyond "Alice has now seen messages up to event X." Recipients who disable read receipts (`send_read_receipts = false`) never emit such events, and the server enforces the toggle.

11.11 Integração na cadeia de auditoria

Para contas Enterprise, cada operação de chat é adicionada ao log de auditoria infalsificável existente (`enterprise_audit_log`, cadeia de hash SHA3-256 — ver §18). Os tipos de ação reservados são:

`CHAT_CONVERSATION_CREATED`, `CHAT_PARTICIPANT_ADDED`, `CHAT_PARTICIPANT_REMOVED`, `CHAT_MESSAGE_SENT`, `CHAT_MESSAGE_READ`, `CHAT_KEYBUNDLE_PUBLISHED`, `CHAT_KEYBUNDLE_ROTATED`, `CHAT_OPK_TOPPED_UP`, `CHAT_CONVERSATION_LEFT`.

O registo de auditoria contém apenas o UUID da conversa, o login do actor, e um timestamp — **nunca** o payload criptografado, as chaves de ratchet, ou os conteúdos das mensagens.

11.12 O que o servidor vê

Visible to server	Not visible
`conversation_uuid`, list of participants (by `mail_account.name`)	Plaintext message content
Encrypted `MessageContainer` payloads (opaque ciphertexts)	Ratchet keys, chain keys, message keys
Public halves of IK, SPK, OPK; Ed25519 signatures on SPK	Private halves of any keypair
OPK consumption counter and timestamp	Which OPK was consumed for which conversation (correlation prevented by HKDF-info binding only existing client-side)
Conversation cadence (timestamps of `chat_events` rows)	Quoted reply chains, file attachments inside the container
Presence boolean (online/offline)	Typing indicators (peer-to-peer only, never reach the server)
Audit-chain entries for Enterprise accounts	Plaintext content of audit entries

11.13 Auditorias criptográficas

O protocolo AAR foi implementado de raiz em TypeScript e passou por três auditorias independentes assistidas por IA, documentadas em `typescript/manager/chat/crypto/AUDIT.md`, `AUDIT_SECOND_OPINION.md` e `AUDIT_THIRD_OPINION.md`. As conclusões de cada ronda foram integradas antes do deployment público. As principais superfícies auditadas foram: simetria do handshake, reserva de OPK sob concorrência, deep-cloning do estado imutável do ratchet, e o framing AEAD do `MessageContainer`.

11.14 Limites de implementação

The chat code base lives in `typescript/manager/chat/` (~9,000 lines of TypeScript) and `includes/classes/Ap` (PHP service layer). Key audit artifacts:

```
crypto/aar-types.ts            — type-only declarations, no logic
crypto/aar-keybundle.ts        — KeyBundle creation, rotation, serialization
crypto/aar-x3dh.ts             — Handshake (initiator + responder paths)
crypto/aar-double-ratchet.ts   — Root chain, sending chain, receiving chain
```

The clean separation between protocol logic (`crypto/`) and transport/UI (`chat-store.ts`, `chat-panel.ts`, …) ensures that the cryptographic core can be re-audited without UI scope creep.

12. Chamadas de vídeo Aionda — Videoconferência E2EE pós-quântica

O Aionda Mail inclui chamadas de vídeo em grupo criptografadas de ponta a ponta (suíte criptográfica `AIONDA_PQ_CALL_V1`). O relé de mídia nunca vê áudio ou vídeo em claro — ele encaminha apenas quadros cifrados. As chaves de grupo são acordadas com um handshake **híbrido pós-quântico**.

12.1 Objetivos de segurança & modelo de confiança

No escopo — o protocolo fornece:

- **Confidencialidade** da mídia de áudio e vídeo, de ponta a ponta.
- **Autenticidade** do grupo — todo participante é criptograficamente membro do mesmo grupo MLS, verificado fora de banda através da Short Authentication String (Seção 12.5).
- **Forward secrecy** — a mídia passada permanece secreta mesmo que as chaves atuais sejam comprometidas posteriormente.
- **Post-compromise security** — o grupo recupera a confidencialidade depois que um membro comprometido é removido e o grupo renova as chaves.
- **Confidencialidade pós-quântica** — o estabelecimento do grupo usa a KEM híbrida X-Wing.
- **Independência do servidor** — uma SFU, um servidor de sinalização ou uma camada de armazenamento mal-intencionados ou comprometidos não conseguem ler nem injetar mídia.

Fora do escopo (explicitamente *não* defendido):

- Análise de tráfego — temporização de pacotes, tamanhos de pacotes, número de participantes e duração da chamada são observáveis (Seção 12.9).
- Comprometimento do endpoint (consulte a suposição de confiança abaixo).
- Malware em nível de sistema operacional ou apreensão física do dispositivo.

Suposição de confiança do endpoint. O modelo pressupõe um navegador e um sistema operacional não comprometidos. Os quadros são selados dentro do pipeline de mídia do navegador (`RTCRtpScriptTransform`), mas um endpoint comprometido pode ler a mídia em claro *antes* da criptografia ou *depois* da descriptografia. O modelo de confiança da entrega web e suas mitigações (assinatura de respostas Guardian) são abordados na Seção 18 e na Seção 23.

12.2 Por que um protocolo dedicado?

A videoconferência em tempo real tem dois requisitos que as camadas de e-mail e chat não têm:

1. **Criptografia por quadro à velocidade da linha.** Os quadros de áudio/vídeo precisam ser criptografados individualmente para que uma Selective Forwarding Unit (SFU) possa roteá-los, descartá-los e reordená-los sem nunca descriptografá-los. Esse é o papel do **SFrame** (RFC 9605).
2. **Acordo dinâmico de chaves de grupo.** Os participantes entram e saem durante a chamada. Cada alteração de participantes deve renovar a chave do grupo com forward secrecy e post-compromise security. Esse é o papel do **MLS** (RFC 9420).

A SFU do lado do servidor (`mediasoup`) é tratada como **infraestrutura não confiável**: é um roteador de pacotes de conhecimento zero, exatamente como a camada de armazenamento para e-mail.

12.3 Suíte criptográfica — `AIONDA_PQ_CALL_V1` (`0xFF01`)

O perfil MLS substitui as primitivas clássicas de uma suíte MLS padrão por híbridos pós-quânticos.

Role	Algorithm	Notes
HPKE KEM	**X-Wing** (ML-KEM-768 + X25519)	Hybrid; `draft-connolly-cfrg-xwing-kem`
Signatures	**ML-DSA-65**	NIST FIPS 204 (Dilithium), Level 3
KDF	HKDF-SHA-256	RFC 5869
AEAD (HPKE + SFrame)	**AES-256-GCM**	AES-256 provides a comfortable margin against known quantum search (Grover) attacks

Sem downgrade. Não há fallback exclusivamente clássico. Se o handshake pós-quântico não puder ser concluído, a chamada falha de forma fechada (fail closed) — um downgrade é um erro fatal, nunca um enfraquecimento silencioso.

Maturidade do X-Wing. O X-Wing é atualmente um draft do IETF/CFRG (`draft-connolly-cfrg-xwing-kem`). O perfil atual o adota como a KEM híbrida preferida; revisões futuras do protocolo poderão migrar para uma KEM híbrida finalizada e padronizada pelo CFRG/NIST, preservando inalteradas as camadas MLS e SFrame.

Agilidade criptográfica. O identificador da suíte criptográfica (`0xFF01`) determina totalmente a KEM, o algoritmo de assinatura, a KDF e o AEAD. Uma futura `AIONDA_PQ_CALL_V2` pode substituir qualquer primitiva sem alterar as camadas superiores do protocolo; as suítes são selecionadas por identificador e nunca negociadas silenciosamente para baixo.

12.4 Acordo de chaves de grupo (MLS, RFC 9420)

Cada participante é representado na árvore de ratchet MLS por um **KeyPackage** (chave pública KEM X-Wing + credencial ML-DSA-65). O grupo evolui através de *épocas*:

- **Welcome / Commit** — um membro que entra é adicionado com um segredo de caminho encapsulado por X-Wing; a árvore de ratchet avança para uma nova época.
- **Renovação de chaves a cada alteração de participantes.** Qualquer alteração — uma entrada, uma saída, a substituição de um dispositivo ou a rotação de uma chave de identidade — avança o grupo para uma nova época. É isso que entrega a forward secrecy (um novo membro não consegue ler a mídia passada) e a post-compromise security (um membro removido não consegue ler a mídia futura).
- **Remove-Commit.** Quando um participante sai (ou é detectado um peer obsoleto/zumbi), o proprietário emite um Remove-Commit que renova a chave do grupo, de modo que um membro que saiu não consegue descriptografar quadros subsequentes mesmo que tenha retido material de chave antigo.

A construção híbrida foi projetada de modo que comprometer apenas **um** componente — ML-KEM-768 *ou* X25519 — não revele, por si só, o segredo do grupo.

12.5 Identidade & autenticação

- **Credenciais.** Cada membro carrega uma **Credential** MLS que vincula uma identidade de participante à sua chave de assinatura ML-DSA-65. Toda mensagem de handshake MLS (Welcome / Commit / Update) é assinada com essa chave, de modo que a SFU ou o servidor de sinalização não conseguem forjar operações de grupo.
- **Short Authentication String (SAS).** O link da sala carrega um **segredo pré-compartilhado** de alta entropia no fragmento da URL, que nunca é enviado ao servidor em claro. O exportador do grupo MLS e esse segredo são combinados em uma Short Authentication String, cuja impressão digital o cliente **fixa (pin)**. Uma divergência — por exemplo, um servidor de sinalização ou uma SFU tentando inserir um participante malicioso — dispara um **aborto imediato sem fallback suave**. Isso vincula o grupo criptográfico ao segredo da sala fora de banda e derrota o man-in-the-middle do lado do servidor.
- **Fator de autenticação.** Para uma sala de convidados, *a posse do link da sala equivale à posse da credencial da sala* — o segredo da sala é o único fator de autenticação. Participantes Aionda autenticados, além disso, resgatam um token de sinalização assinado e vinculado à conta (Seção 12.8).

12.6 Criptografia de mídia (SFrame, RFC 9605)

Cada faixa de mídia é criptografada quadro a quadro **antes** de chegar à SFU. O ciclo de vida da chave:

```
MLS group secret
      |  MLS Exporter (RFC 9420 §8)
      v
SFrame base key
      |  HKDF(base_key, KID = sender || epoch)
      v
per-sender key
      |  AES-256-GCM(nonce = frame counter, aad = sframe_header)
      v
per-frame ciphertext || tag      ->  wire = sframe_header || ciphertext || tag
```

- A chave SFrame é derivada do **MLS Exporter**, de modo que só existe nos membros autenticados do grupo — nunca no servidor.
- A criptografia roda em um Worker `RTCRtpScriptTransform` dedicado (a API padronizada de Encoded-Transform, disponível no Chromium e no Safari/WebKit), de modo que os quadros são selados no pipeline de mídia do navegador.
- O codec é VP8; a SFU faz o roteamento de keyframes apenas com base nos metadados — ela nunca inspeciona o payload criptografado.

12.7 Proteção contra replay

Cada quadro criptografado carrega um **contador** SFrame monotônico dentro de seu cabeçalho autenticado e é vinculado à época MLS atual. Os receptores rastreiam o maior contador visto por remetente (um armazenamento de contadores persistido no lado do receptor). Um quadro com um contador duplicado ou regredido, ou vinculado a uma época obsoleta, é rejeitado — um ciphertext capturado não pode ser reproduzido (replay) na sessão.

12.8 Sinalização & modelo de acesso

- **Sinalização** ocorre sobre um WebSocket autenticado (`aionda_signaling`). Cada sessão é controlada por um **JWT** de curta duração, emitido pelo servidor de aplicação depois que o cliente resgata o segredo da sala via a API criptografada `/e` (consulte a Seção 8). O token é simétrico (HS256) e validado apenas entre o servidor de aplicação e o único serviço de sinalização; ele autoriza a configuração da sessão e nunca carrega mídia nem segredos de grupo. O servidor de sinalização retransmite as mensagens MLS Welcome/Commit, mas não consegue lê-las.
- **Link da sala = credencial portadora.** Qualquer pessoa que detenha o link completo (UUID da sala + segredo do fragmento) pode entrar — o modelo é intencionalmente "quem tem o link entra". Os IDs de banco de dados nunca são expostos; as salas são endereçadas apenas por UUIDs impossíveis de adivinhar.
- **Controle do proprietário.** O proprietário da sala (verificado no lado do servidor pela posse da conta) pode marcar uma sala como *encerrada* para bloquear entradas futuras, e pode remover um participante presente via um MLS Remove-Commit (Seção 12.4).

12.9 O que a SFU / o servidor vê — e limitações de metadados

A infraestrutura PODE ver	A infraestrutura NÃO PODE ver
Tamanhos dos quadros criptografados, temporização, metadados de roteamento	Conteúdo de áudio ou vídeo (os quadros são selados com AES-256-GCM)
Ciphertext do handshake MLS (Welcome/Commit)	Segredos de grupo ou chaves SFrame (derivados no lado do cliente a partir do exportador MLS)
UUID da sala, número de participantes, subject do JWT	O segredo do link da sala (reside no fragmento da URL)
Candidatos ICE / endereços de transporte	Qualquer texto em claro que lhe permitisse entrar ou descriptografar a sessão

Metadados que o sistema intencionalmente não oculta: endereços IP expostos à infraestrutura ICE / STUN / TURN, temporização de pacotes, tamanhos de pacotes, número de participantes e duração da chamada. A resistência à análise de tráfego não é um objetivo de projeto (Seção 12.1).

12.10 Propriedades de segurança (resumo)

Propriedade	Garantia
Confidencialidade	Apenas os membros atuais do grupo MLS possuem as chaves SFrame.
Autenticação	Todas as mensagens MLS são assinadas com ML-DSA-65; o grupo é vinculado ao segredo da sala via a SAS fixada (pinned).
Forward secrecy	O comprometimento dos segredos atuais não revela a mídia passada.

Propriedade	Garantia
Post-compromise security	A renovação de chaves restaura a confidencialidade depois que um membro é removido.
Independência do servidor	O comprometimento do servidor de sinalização, da SFU ou do armazenamento não expõe a mídia.
Pós-quântico	O estabelecimento do grupo depende da KEM híbrida X-Wing (ML-KEM-768 + X25519).

Essas propriedades descrevem o *projeto* do protocolo. Uma auditoria criptográfica independente de terceiros do subsistema de chamadas está planejada; até que seja publicada, as garantias acima são uma autoavaliação.

---

13. Tarefas Aionda - Gerenciamento de tarefas criptografado de ponta a ponta

O Aionda Mail inclui um gerenciador de tarefas criptografado: listas de tarefas, subtarefas, notas, datas de vencimento, lembretes e tarefas recorrentes. Ele segue as mesmas regras zero-knowledge da caixa de entrada. Tudo o que o usuário escreve é criptografado no navegador; o servidor armazena apenas texto cifrado, mais um pequeno conjunto de campos de agendamento deliberadamente em claro.

13.1 Uma chave por tarefa

Cada tarefa e cada lista de tarefas recebe sua própria chave de 32 bytes recém-gerada (AES-256-GCM), criada no navegador com o gerador de aleatoriedade da API WebCrypto. Os campos de conteúdo são criptografados com essa chave; a própria chave é então envelopada com a chave mestra do cofre:

```
chave de tarefa aleatória de 32 bytes
      |  AES-256-GCM, IV de 96 bits novo para cada campo
      v
encrypted_title / encrypted_notes / encrypted_steps / encrypted_metadata

chave mestra do cofre
      |  HKDF-SHA-256(salt = 32 bytes aleatórios, info = "trashmail-tasks-v1")
      v
chave de envelopamento
      |  AES-256-GCM
      v
wrapped_key = version(1) || salt(32) || IV(12) || texto cifrado || tag
```

O servidor armazena apenas `wrapped_key` e as colunas cifradas. Ele não recebe a chave da tarefa, nem a chave mestra, nem qualquer texto em claro. Sem a chave mestra, que nunca sai do navegador, a chave envelopada não pode ser aberta.

Separação de domínios. O rótulo HKDF `trashmail-tasks-v1` é específico do módulo de tarefas. Sem um rótulo assim, uma chave envelopada produzida por outro módulo (calendário,

contatos) seria intercambiável com uma chave de tarefa. O rótulo vincula cada chave envelopada ao módulo que a criou.

Descriptografia independente. As tarefas e as listas são descriptografadas uma a uma. Um registro ilegível é anotado no log e ignorado, em vez de fazer toda a visualização falhar, de modo que um texto cifrado danificado não deixa o usuário sem acesso às demais tarefas.

13.2 O que é criptografado

Campo	Conteúdo	Proteção
`encrypted_title`	Título da tarefa	AES-256-GCM com a chave da tarefa
`encrypted_notes`	Nota de texto livre	AES-256-GCM com a chave da tarefa
`encrypted_steps`	Array JSON das subtarefas (texto e estado de conclusão)	AES-256-GCM com a chave da tarefa
`encrypted_metadata`	JSON, incluindo a regra de recorrência (RRULE)	AES-256-GCM com a chave da tarefa
`encrypted_name`	Nome de uma lista de tarefas	AES-256-GCM com a chave da lista

Cada campo é selado com um IV de 96 bits próprio e novo, de modo que o mesmo texto em claro nunca produz o mesmo texto cifrado.

Os nomes das listas também são criptografados. Uma lista chamada “Aquisição Contoso” é conteúdo, não metadado, e é tratada como tal. O servidor vê que uma conta possui cinco listas, mas não como elas se chamam.

13.3 Metadados deliberadamente em claro

Um pequeno conjunto de campos de agendamento é armazenado em claro, para que o servidor possa filtrar, ordenar, contar e disparar lembretes sem descriptografar nada:

Campo em claro	Finalidade
Data de vencimento	Lista inteligente “Planejado”, detecção de atrasos, ordenação
Hora do lembrete	Disparar o lembrete no momento certo
Marcação de importante	Lista inteligente “Importante”
Marcação de concluído e hora de conclusão	Separar tarefas abertas de tarefas concluídas
Data de “Meu Dia”	Lista inteligente “Meu Dia”, válida apenas para o dia atual
Posição	Ordenação manual dentro de uma lista
Atribuição de lista (UUID)	Agrupamento das tarefas sob a respectiva lista
E-mail vinculado (UUID)	Referência ao e-mail a partir do qual a tarefa foi criada

O servidor fica sabendo quando algo vence, nunca o que é. Ele pode determinar que uma conta tem quatorze tarefas abertas, três delas com vencimento em 3 de agosto e uma marcada

como importante. Não consegue ler um único título, nota, subtarefa, regra de recorrência ou nome de lista.

É o mesmo compromisso já assumido para os horários dos compromissos do calendário, e ele é divulgado em vez de escondido. A alternativa - criptografar também a data de vencimento - obrigaria o cliente a baixar e descriptografar o conjunto completo de tarefas a cada filtro, a cada contador e a cada lembrete. Os campos de agendamento não carregam conteúdo, e os objetos aos quais pertencem são endereçados exclusivamente por UUID.

13.4 A lista “E-mail sinalizado”

A lista “E-mail sinalizado” não é um segundo repositório de dados. É uma visualização sobre a estrela que já existe nos e-mails da caixa de entrada, de modo que nenhum dado em claro adicional é criado para ela.

Os assuntos exibidos nessa lista são descriptografados exclusivamente no cliente, pelo caminho habitual de descriptografia de e-mail (Seção 7.2): a chave do e-mail em questão é desembrulhada no navegador e o assunto é descriptografado ali. O módulo de tarefas nunca manipula uma chave de e-mail nem solicita um assunto ao servidor.

13.5 Transporte, endereçamento e modo de supervisão

- **Transporte criptografado.** Todos os endpoints de tarefas trafegam pela camada de transporte criptografada `/e` (Seção 8). Requisição e resposta são seladas com o KEM híbrido, de modo que uma CDN ou qualquer outro intermediário vê apenas um `POST /e` com uma carga opaca, e não qual tarefa foi criada, renomeada ou concluída.
- **Somente UUID.** As tarefas, as listas e os e-mails vinculados são endereçados exclusivamente por UUID. Os identificadores internos do banco de dados nunca são expostos, o que elimina a enumeração como via de ataque.
- **Modo de supervisão.** Quando um proprietário administra a caixa de entrada de um funcionário ou de um agente de IA, o módulo de tarefas aplica a mesma separação de chaves do restante do cofre: as chaves de tarefa são envelopadas com a chave mestra do contexto supervisionado, não com a do proprietário. Se essa chave de contexto não estiver disponível, a operação falha de forma dura. Não existe, deliberadamente, nenhum recuo para a chave do proprietário - um recuo silencioso gravaria as tarefas de um funcionário com a chave errada. Isso seria um enfraquecimento criptográfico, e um enfraquecimento precisa falhar de forma ruidosa em vez de ser bem-sucedido em silêncio.

13.6 Validação de entrada contra truncamento silencioso

O comprimento de cada bloco cifrado é verificado no servidor antes da gravação:

Campo	Limite
Título da tarefa, nome da lista	2.048 bytes
Nota	1 MiB
Subtarefas	256 KiB
Metadados	256 KiB
Chave envelopada	de 60 a 1.700 bytes

Valores grandes demais são rejeitados com um erro explícito. Trata-se de um controle de

integridade com consequências diretas para a confidencialidade: dependendo do modo SQL, o banco de dados truncaria silenciosamente um valor grande demais. Um texto cifrado AES-GCM truncado falha na autenticação e seu conteúdo fica permanentemente ilegível, inclusive para o usuário. Recusar a gravação é o único comportamento seguro.

13.7 O que o servidor vê - e o que não vê

O servidor PODE ver	O servidor NÃO PODE ver
Datas de vencimento, horas de lembrete, datas de “Meu Dia”	Títulos das tarefas, notas, subtarefas
Marcações de importante e concluído, hora de conclusão	O nome de qualquer lista de tarefas
Número de tarefas e listas, sua ordem e agrupamento	Regras de recorrência e todos os demais metadados
O UUID de um e-mail vinculado	O conteúdo ou o assunto desse e-mail
Tamanhos do texto cifrado, datas de criação e modificação	Qualquer material de chave: chaves de tarefa, de lista e chave mestra

---

14. Proteções contra canais laterais

14.1 Bucket Padding

Problema: Os tamanhos de e-mails criptografados podem revelar informação. Um atacante que observe os comprimentos dos ciphertexts pode inferir o conteúdo (por exemplo, um e-mail de 50 bytes é provavelmente “OK, obrigado” enquanto um e-mail de 500 KB contém anexos).

Solução: Todos os dados são alinhados para “buckets” de tamanho fixo antes da criptografia:

```
Bucket sizes: 256B, 512B, 1KB, 2KB, 4KB, 8KB, 16KB, 32KB,
              64KB, 128KB, 256KB, 512KB, 1MB, 2MB, 4MB, 8MB, 16MB

Format: [0xDEAD magic][4-byte length][actual data][random padding to bucket boundary]
```

Exemplo: Um e-mail de 523 bytes é alinhado para 1.024 bytes. Um observador vê apenas “e-mail de 1KB” — não o tamanho real de 523 bytes.

14.2 Compressão antes da criptografia

Os dados são comprimidos com gzip (nível 6) **antes** da criptografia. Esta é a única ordem correta:

- A compressão após criptografia falharia (dados criptografados têm entropia máxima)
- O bucket padding após a compressão previne ataques tipo CRIME/BREACH que exploram rácios de compressão

14.3 Privacidade do threading

Os threads de e-mail usam hashes SHA-256 dos cabeçalhos Message-ID em vez de identificadores em claro. O servidor pode agrupar e-mails relacionados por igualdade de hash sem saber os identificadores reais das mensagens.

---

15. Gerenciamento e ciclo de vida das chaves

15.1 Hierarquia de chaves

```
Vault Master Key (32 bytes, generated once per account)
   |
   |--- Vault Keypair (Hybrid KEM)
   |    |-- X25519 public key (32 bytes) — stored plaintext on server
   |    |-- X25519 private key (32 bytes) — encrypted with master key
   |    |-- ML-KEM-1024 public key (1568 bytes) — stored plaintext on server
   |    |-- ML-KEM-1024 private key (3168 bytes) — encrypted with master key
   |
   |--- Per-Email Ephemeral Keys (32 bytes each)
   |    |-- Wrapped with recipient's Hybrid KEM public keys
   |
   |--- Per-Attachment Ephemeral Keys (32 bytes each)
   |    |-- Wrapped independently per attachment
   |
   |--- Folder Keys (derived via HKDF per folder)
   |    |-- Shared via Hybrid KEM encapsulation per recipient
   |
   |--- Signature Encryption Key (derived from master key)
        |-- Encrypts email signature templates
```

15.2 Armazenamento de chaves

Key	Storage Location	Protection
Master Key	Nowhere (reconstructed on-demand from Shamir shares)	Shamir 2-of-3
Vault private keys	Server (encrypted)	AES-256-GCM with master key
Vault public keys	Server (plaintext)	Not sensitive — public by definition
Email ephemeral keys	Server (wrapped)	Hybrid KEM encapsulation
OPAQUE records	Server (encrypted at rest)	AES-256-GCM with server key
Encrypted Shamir shares	Server	XOR with password/passkey/recovery derived keys
API transport keys	Server (pre-generated pool)	One-time use, 24h TTL

15.3 Fingerprints de chaves

Each vault keypair has a SHA-256 fingerprint stored on the server. This allows:

- Audit trail of key rotations
- Detection of unauthorized key changes
- Client-side verification of key integrity

---

16. Mecanismo de recuperação

16.1 Chave de recuperação (mnemónica BIP39)

Durante a configuração do cofre, o usuário recebe uma **frase de recuperação de 24 palavras** gerada a partir de 256 bits de entropia, codificada usando a norma BIP39:

```
Example: apple river mountain sunset golden bridge falcon ocean
         crystal thunder meadow silver dolphin forest marble castle
         velvet compass harbor window ancient pepper rocket shield
```

16.2 Derivação da chave de recuperação

```
1. Generate: 256 bits random entropy
2. Encode:   BIP39 mnemonic (24 words, 11 bits per word)
3. Derive:   verificationKey = HKDF-SHA3-256(
                 entropy,
                 salt = accountId,
                 info = "trashmail-recovery-verify"
             )
4. Hash:     verificationHash = SHA3-256(verificationKey)
5. Store:    Server stores ONLY verificationHash (32 bytes)
```

16.3 O que o servidor armazena

O servidor armazena **apenas o hash SHA3-256** de uma chave de verificação derivada. Não armazena:

- As palavras de recuperação
- A entropia
- A própria chave de verificação

16.3.4 Recovery Flow

1. User enters 24-word recovery phrase
2. Client derives entropy -> HKDF-SHA3-256 -> SHA3-256 -> verification hash
3. Client sends verification hash to server (never the plaintext key)
4. Server compares with stored hash
5. If match: All 2FA methods are disabled, user sets up fresh authentication
6. Recovery key is revoked after single use

16.3.5 Rate Limiting

- Maximum 3 verification attempts per hour
- 60-minute lockout after exceeding limit
- One-time use: recovery key is permanently revoked after successful use

16.3.6 No Password Recovery

Não existe reposição de senha via e-mail. Se um usuário perde a sua senha E todos os outros factores de autenticação (passkey + chave de recuperação), os seus dados ficam permanentemente inacessíveis. Esta é a prova fundamental de que o zero-knowledge funciona — se o serviço pudesse recuperar dados do usuário, também os poderia ler.

---

17. Autenticação sem senha (Passkeys)

17.1 Extensão WebAuthn PRF

A Aionda Mail suporta passkeys FIDO2 (chaves de segurança em hardware, autenticadores biométricos) para login sem senha e desbloqueio do cofre.

A **extensão WebAuthn PRF (Pseudo-Random Function)** fornece uma saída determinística de 32 bytes ligada à passkey e credencial específicas. Esta saída é usada para proteger a Parte 2 do Shamir.

17.2 Como funciona

```
1. Registration:
   - User creates passkey via navigator.credentials.create()
   - PRF extension generates hardware-bound output
   - Output XOR'd with Shamir Share 2 -> encrypted share stored on server

2. Authentication:
   - User authenticates with passkey (biometric/PIN)
   - PRF extension reproduces same 32-byte output
   - Output XOR'd with encrypted share -> Shamir Share 2 recovered
   - Combined with Share 1 (password) -> Master Key reconstructed

3. Vault Unlock (passwordless):
   - If both passkey (Share 2) and password (Share 1) available -> immediate unlock
   - Password verified via OPAQUE (separate from passkey auth)
```

17.3 Múltiplas passkeys

Os usuários podem registar várias passkeys (por exemplo, MacBook Touch ID, iPhone Face ID, YubiKey). Cada passkey protege independentemente a sua própria cópia da Parte 2. Qualquer passkey combinada com a senha é suficiente para desbloquear o cofre.

---

18. Guardian: Proteção MITM & assinatura de respostas

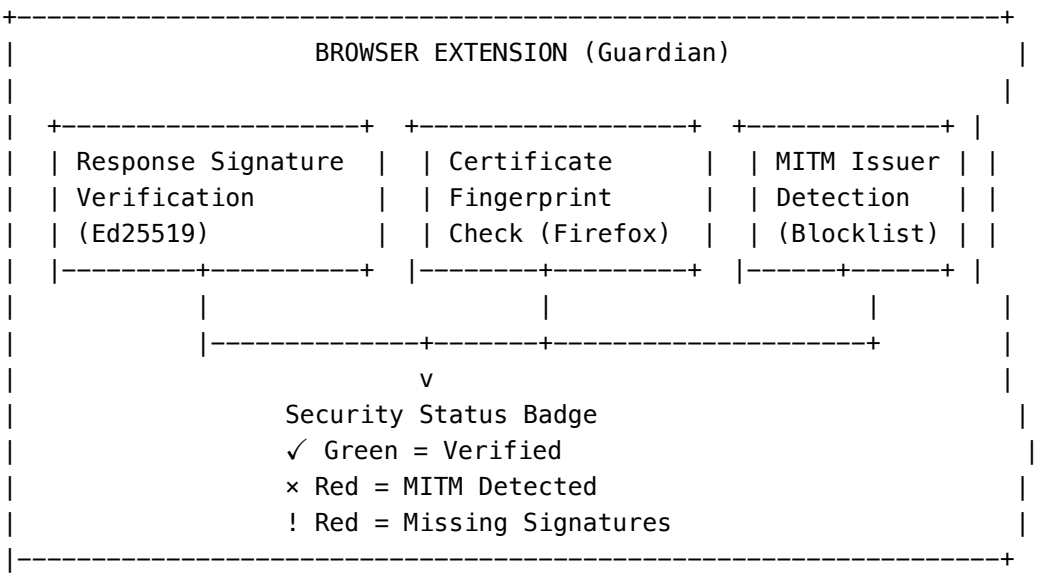
18.1 O problema com aplicações web

Every web application has an inherent trust problem: the browser downloads JavaScript from the server on every visit. A man-in-the-middle (MITM) attacker — whether a compromised CDN, corporate proxy, or rogue ISP — could theoretically inject modified code that exfiltrates encryption keys.

Aionda Mail addresses this with the **Guardian module**, a browser extension component (available for Chrome and Firefox) that independently verifies server integrity.

18.2 Visão geral da arquitetura

The Guardian module operates inside the browser extension's Service Worker — completely independent from the web application's JavaScript. It performs three types of verification:



18.3 Verificação da assinatura de resposta (Ed25519)

Every API response from Aionda Mail's server is cryptographically signed using **Ed25519** (Edwards-curve Digital Signature Algorithm).

Signing process (server-side):

```
1. Server generates API response body (JSON)
2. Construct signing input: responseBody + "|" + unixTimestamp
3. Sign with Ed25519 private key -> 64-byte signature
4. Attach HTTP headers:
   X-Aionda-Signature: <base64(signature)>
   X-Aionda-Timestamp: <unix_timestamp>
   X-Aionda-Key-Id: <key_identifier>
```

Verification process (browser extension):

```
1. Extract signature, timestamp, and key ID from HTTP headers
2. Look up Ed25519 public key by key ID (bundled in extension)
3. Verify key has not expired (valid_from / valid_until)
4. Check timestamp freshness: |now - timestamp| ≤ 300 seconds
5. Reconstruct signing input: responseBody + "|" + timestamp
6. crypto.subtle.verify("Ed25519", publicKey, signature, data)
7. If invalid -> MITM alert, red badge
```

Propriedades centrais:

- **Replay protection:** 5-minute timestamp window prevents replaying old responses
- **Tamper detection:** Any modification to the response body invalidates the signature
- **Key isolation:** Public keys are bundled inside the extension (not downloaded from the server)

- **Environment separation:** Dev keys (`dev-2026-01`) cannot be used on production URLs and vice versa

18.4 Gestão da chave pública Ed25519

Public keys are shipped with the browser extension in `public_key.json`:

```
{
    "keys": {
        "prod-2026-01": {
            "algorithm": "Ed25519",
            "public_key": "<base64 SPKI DER>",
            "valid_from": "2026-01-13T00:00:00Z",
            "valid_until": "2027-01-13T00:00:00Z"
        }
    }
}
```

- **Key format:** SPKI DER (Subject Public Key Info, Distinguished Encoding Rules)
- **Tamanho da chave:** 32 bytes (256-bit Ed25519 public key)
- **Signature size:** 64 bytes (fixed)
- **Rotation:** New keys are added before old keys expire; extension updates deliver new keys
- **No server trust:** Keys are embedded in the extension binary, not fetched from the server

18.5 Verificação do certificado TLS (Firefox)

On Firefox, the Guardian module performs additional TLS certificate verification using the `browser.webRequest.getSecurityInfo()` API (not available in Chrome due to Manifest V3 limitations).

Verification flow:

```
1. Browser extension intercepts HTTPS response
2. Extract TLS certificate chain from browser's security info:
   - Leaf certificate fingerprint (SHA-256)
   - Issuer Distinguished Name (O=, CN=)
   - Subject (CN=)

3. Check against known MITM issuers (hardcoded blocklist):
   ZScaler, Netskope, Fortinet, Palo Alto, Blue Coat,
   Check Point, Barracuda, Sophos, WatchGuard, Cisco Umbrella
   -> If match: MITM detected, show warning

4. Check against trusted issuers:
   Google Trust Services, Cloudflare, Let's Encrypt,
   DigiCert, Sectigo
   -> If match AND subject matches expected domain: OK

5. If unknown issuer: Fetch server's own certificate fingerprint
   - Server connects to itself via external routing (prevents spoofing)
   - Response is Ed25519 signed (prevents MITM from lying about cert)
   - Compare issuer organization with browser's certificate issuer
```

```
   -> If mismatch: MITM suspected, show warning
```

Why issuer-based validation instead of pinning? CloudFlare (used as CDN) rotates leaf certificates across edge servers. Traditional certificate pinning (matching exact fingerprints) would cause false positives. Issuer-based validation is more robust: the issuing CA is stable even when leaf certificates change.

18.6 Self-Certificate Fetching (anti-spoofing)

The server's certificate endpoint uses a clever anti-spoofing technique:

```
Server connects to cert.trashmail.com (or cert-subdomain.domain)
with SNI = mail.aionda.com

-> Forces external routing through CloudFlare
-> Receives the actual certificate that users see
-> Prevents localhost spoofing
-> Response signed with Ed25519 to prevent tampering
```

The server essentially asks "what certificate does the outside world see for my domain?" — and signs the answer so the extension can trust it.

18.7 Indicadores de estado de segurança

The extension displays a badge on the browser toolbar:

Badge	Color	Meaning
✓	Green	All responses verified — signatures valid
!	Orange	Using deprecated signing key (rotation pending)
×	Red	MITM detected — signature verification failed
!	Red	Missing signatures — responses not signed
[Shield]	Blue	Protected mode — no verification performed yet

18.8 Cobertura de ameaças

Attack	Detection Method	Browser
Corporate MITM proxy (ZScaler, Fortinet)	Certificate issuer blocklist	Firefox
Modified API responses	Ed25519 signature verification	Chrome + Firefox
Replay attacks	5-minute timestamp window	Chrome + Firefox
CDN compromise (CloudFlare)	Response signature mismatch	Chrome + Firefox
Certificate substitution	Issuer comparison + server self-check	Firefox
Dev/prod key confusion	Environment-bound key IDs	Chrome + Firefox

18.9 Limitações

- **Chrome Manifest V3:** Cannot inspect TLS certificates — only response signature verification is available
- **Extension required:** Users without the extension do not benefit from Guardian protections
- **Ed25519 is not post-quantum:** Signature verification uses classical cryptography. A sufficiently powerful quantum computer could theoretically forge Ed25519 signatures.

---

19. Arquivo empresarial de e-mail (Blockchain)

19.1 Visão geral

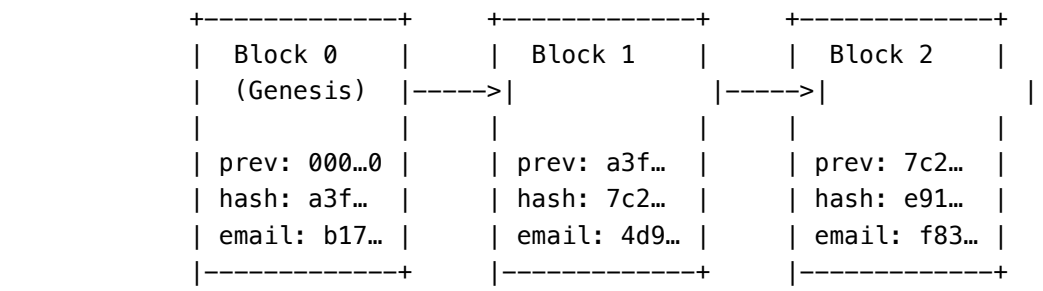
Aionda Mail's Enterprise plan includes a **GoBD-compliant email archive** secured by a cryptographic hash chain (blockchain). Every archived email becomes an immutable block in a per-company chain. Any tampering — modification, deletion, or insertion of blocks — is cryptographically detectable.

The archive combines two independent security layers:

1. **Hash chain (SHA3-256):** Guarantees integrity and immutability — proves no email was altered or removed after archival
2. **Hybrid KEM encryption (CAK):** Guarantees confidentiality — the server cannot read archived email content

19.2 Arquitetura da cadeia de hash

Each archived email becomes a block in a sequential, tamper-evident chain:



Block hash calculation:

```
block_hash = SHA3-256(
    prev_block_hash  || "|" ||
    timestamp        || "|" ||
    email_hash       || "|" ||
    direction        || "|" ||
    sender_domain    || "|" ||
    recipient_domain
)
```

Properties:

- **Hash algorithm:** SHA3-256 (NIST FIPS 202)
- **Genesis block:** `prev_block_hash` = 64 zeros, `block_number` = 0

- **Sequential numbering:** Enforced by database `UNIQUE KEY (company_uuid, block_number)`
- **One chain per company:** Complete isolation between enterprises
- **Email hash:** `SHA3-256(sender || recipient || timestamp || size)` — integrity proof of the original email data

19.3 Deteção de adulteração

The chain verification algorithm detects any form of tampering:

```
For each block (ordered by block_number ASC):

  1. Verify link:    block.prev_block_hash == expected_prev_hash
  2. Recalculate:    expected = SHA3-256(prev_hash | timestamp | email_hash | ...)
  3. Verify content: block.block_hash == expected
  4. Advance:        expected_prev_hash = block.block_hash

If ANY check fails -> chain is broken at block N
```

Tampering Attempt	Detection
Modify email content	`email_hash` changes -> `block_hash` recalculation fails
Modify metadata (sender, domain, timestamp)	Included in hash input -> `block_hash` mismatch
Delete a block	Next block's `prev_block_hash` becomes orphaned
Insert a block	Breaks sequential `block_number` + `prev_block_hash` chain
Reorder blocks	`UNIQUE KEY` constraint + sequential verification prevents this
Replace entire chain	Genesis block hash would differ from any external backup

Verification result reports the exact block number where tampering was detected, with expected vs. actual hash values for forensic analysis.

19.4 Chave de arquivo da empresa (CAK) — criptografia Zero-Knowledge

Archive contents are encrypted end-to-end using a **Company Archive Key** — a Hybrid KEM keypair (X25519 + ML-KEM-1024) generated client-side by the company owner.

```
Company Owner's Browser                          Server
-----------------------                          ------

1. Generate Hybrid KEM keypair (client-side):
   X25519 keypair (32 + 32 bytes)
   ML-KEM-1024 keypair (1568 + 3168 bytes)

2. Derive wrapping key from password:
   wrappingKey = HKDF-SHA256(
     password,
```

```
      salt = "trashmail-archive-{account_id}",
      info = "trashmail-archive-key-wrap",
      length = 32
    )

3. Wrap private keys:
   AES-256-GCM(x25519_priv || mlkem_priv, wrappingKey)

4. Send to server:                          ->   Store:
   • Public keys (plaintext)                       archive_x25519_pub
   • Wrapped private keys (encrypted)              archive_mlkem_pub
                                                   wrapped_archive_key
```

Key distribution to other employees (Admin, Compliance Officer):

1. Owner decrypts CAK private keys with their password
2. Owner re-wraps private keys with target employee's password-derived key
3. Server stores the re-wrapped copy on the employee's record
4. Each authorized employee has their own independently wrapped copy

The server never sees the CAK private keys in plaintext.

19.5 O que é criptografado

When an email is archived, two layers of encryption are applied:

Encrypted metadata (AES-256-GCM with Hybrid KEM):

```json
{
  "d": "INBOUND",
  "s": "user@example.com",
  "r": "admin@company.de",
  "sd": "example.com",
  "rd": "company.de",
  "sz": 45000,
  "ts": "2026-02-27T10:30:00Z",
  "ha": true,
  "ac": 3,
  "en": "John Doe"
}
```

Encrypted email content (separate Hybrid KEM key wrapping):

```json
{
  "subject": "Meeting notes",
  "body": "<html>...</html>",
  "from": "sender@domain.com",
  "to": "recipient@company.de"
}
```

Zero-knowledge enforcement: After encryption, the plaintext metadata fields in the database (sender_address, recipient_address, domains) are replaced with their SHA3-256 hashes. The server stores only hashes — the original values exist only inside the encrypted blobs.

19.6 Trilho de auditoria

Every action on the archive is logged in an **independent audit chain** (also hash-chained with SHA3-256):

Action	When Logged
`EMAIL_RECEIVED` / `EMAIL_SENT` / `DRAFT_ARCHIVED`	Email archived
`VIEW_EMAIL` / `VIEW_ATTACHMENT`	Employee reads archived email
`SEARCH_ARCHIVE`	Search performed
`EXPORT_EMAIL` / `EXPORT_REPORT`	Data exported
`VERIFY_CHAIN` / `CHAIN_VERIFIED_OK` / `CHAIN_VERIFIED_BROKEN`	Integrity check
`LEGAL_HOLD_SET` / `LEGAL_HOLD_RELEASED`	Legal hold toggled
`ARCHIVE_DECRYPT`	CAK used to decrypt content
`ADMIN_ACCESS`	Administrative action

Each audit entry records: actor (UUID + role), IP address, session ID, target email hash, and whether the chain was valid at the time of access.

19.7 Retenção legal e prazos de retenção

- **Retention period:** Configurable per company (default: 10 years), calculated per email as `archived_at + retention_years`
- **Legal hold:** Individual emails can be placed under legal hold, preventing deletion until released. Includes reason, actor, and timestamp.
- **GoBD compliance:** The combination of immutable hash chain, complete audit trail, configurable retention, and legal hold satisfies the requirements of the German GoBD (Grundsätze zur ordnungsmäßigen Führung und Aufbewahrung von Büchern, Aufzeichnungen und Unterlagen in elektronischer Form sowie zum Datenzugriff).

19.8 Exportação forense

Authorized users (Owner, Admin) can export the complete chain state for independent verification:

- Full chain data with all block hashes
- Verification result (valid/broken, broken block number if applicable)
- Expected vs. actual hash values for forensic analysis
- Last 50 audit log entries
- JSON format for external re-verification with any SHA3-256 implementation

---

20. O que o servidor vê — e o que não vê

This section explicitly documents the zero-knowledge boundary.

20.1 O que o servidor PODE ver

Data	Why Visible	Mitigation
IP address	TCP/IP requirement	Use VPN/Tor if desired
Timestamps	Email reception time	Inherent to email protocol
Encrypted email blobs	Stored for retrieval	AES-256-GCM encrypted, key unknown to server
Padded ciphertext sizes	Storage requirement	Bucket padding hides actual sizes
Recipient DEA address	Routing requirement	DEA is disposable, not the real address
Account existence	Authentication flow	User enumeration protection deployed
Public keys	Required for encryption by server	Public by definition, not sensitive
Encrypted Shamir shares	Storage for user	XOR'd with keys server doesn't know
OPAQUE records	Authentication protocol	Not password hashes, encrypted at rest

20.2 O que o servidor NÃO PODE ver

Data	Why Invisible
Email content (subject, body, headers)	Encrypted with ephemeral keys wrapped via Hybrid KEM
User password	OPAQUE — password never transmitted
Master key	Reconstructed only in browser from Shamir shares
Vault private keys	Encrypted with master key before storage
Email ephemeral keys	Wrapped with Hybrid KEM, server lacks private keys
Recovery key / mnemonic	Only SHA3-256 hash of derived key stored
Passkey PRF outputs	Hardware-bound, never leave authenticator
Folder names	Encrypted with folder-specific keys
Email signatures	Encrypted with master key
API request content	Encrypted via /e transport layer
API response content	Encrypted before transmission

20.3 Garantia criptográfica

Even with full access to:

- The complete database
- All network traffic
- The server's source code and configuration
- All OPAQUE records and server keys

…an attacker **cannot** decrypt a single email without the user's password (or passkey + recovery key). This is not a policy — it is a mathematical impossibility enforced by the cryptographic design.

---

21. Referência de algoritmos

21.1 Tabela completa de algoritmos

Component	Algorithm	Parameters	Standard
Password authentication	OPAQUE	RFC 9807, aPAKE	RFC 9807
Password key derivation	PBKDF2-SHA256	600,000 iterations, 32B salt, 32B output	NIST SP 800-132
Vault encryption	AES-256-GCM	256-bit key, 96-bit nonce, 128-bit tag	NIST SP 800-38D
Classical key exchange	X25519	Curve25519, 256-bit	RFC 7748
Post-quantum KEM	ML-KEM-1024	Kyber-1024, NIST Level 5	NIST FIPS 203
Hybrid key derivation	HKDF-SHA256	64B IKM, info="trashmail-hybrid-kem-v1"	RFC 5869
Secret sharing	Shamir SSS	k=2, n=3, GF(2^8)	Shamir (1979)
Recovery key encoding	BIP39	256-bit entropy, 24 words	BIP-0039
Recovery key derivation	HKDF-SHA3-256	Account-bound salt	NIST FIPS 202
Recovery key verification	SHA3-256	32-byte output	NIST FIPS 202
OPAQUE record encryption	AES-256-GCM	Server-side at-rest encryption	NIST SP 800-38D
Passkey vault unlock	WebAuthn PRF	HMAC-based, hardware-bound	WebAuthn Level 2
Compression	gzip	Level 6	RFC 1952
Bucket padding	Custom	17 sizes (256B–16MB), 0xDEAD magic	—
Response signing	Ed25519	256-bit key, 512-bit signature	RFC 8032
Archive hash chain	SHA3-256	Per-block hash, sequential linking	NIST FIPS 202
Archive key wrapping (CAK)	HKDF-SHA256 + AES-256-GCM	Password-derived wrapping key	RFC 5869 / NIST SP 800-38D
Certificate verification	SHA-256	TLS cert fingerprint comparison	—
Email threading	SHA-256	Hash of Message-ID	NIST FIPS 180-4
Chaves de grupo de chamada de vídeo	MLS + X-Wing	Suíte `AIONDA_PQ_CALL_V1` (0xFF01), ML-KEM-768 + X25519	RFC 9420 / draft-connolly-cfrg-xwing-kem
Assinaturas de chamada de vídeo	ML-DSA-65	Dilithium, NIST Nível 3	NIST FIPS 204
Mídia de chamada de vídeo	SFrame (AES-256-GCM)	Por quadro, chave do exportador MLS	RFC 9605

21.2 Níveis de segurança

Algorithm	Classical Security	Post-Quantum Security
X25519	128-bit	Broken by Shor's algorithm
ML-KEM-1024	256-bit equivalent	NIST Level 5 (≈AES-256)
AES-256-GCM	256-bit	128-bit (Grover's algorithm)
SHA-256	256-bit	128-bit (Grover's algorithm)
SHA3-256	256-bit	128-bit (Grover's algorithm)
Hybrid KEM (combined)	128-bit (X25519 bound)	Level 5 (ML-KEM bound)

---

22. Comparação com outros fornecedores

Feature	Aionda Mail	Tuta Mail	Proton Mail
Country	Germany (Stuttgart)	Germany (Hannover)	Switzerland
Zero-Knowledge	Yes (OPAQUE + client-side crypto)	Yes	Yes
Post-Quantum	Yes (ML-KEM-1024 + X25519 Hybrid)	Yes (Kyber-based)	In development
Password protocol	OPAQUE (RFC 9807) — password never leaves browser	bcrypt (password sent to server over TLS)	SRP-based
Subject encrypted	Yes	Yes	No
Headers encrypted	Yes	Partial	No
Contact names encrypted	Yes (in vault)	Yes	No
Disposable email addresses	Yes (core feature, unlimited for Plus)	No	Yes (via SimpleLogin)
Browser addon	Yes (Chrome + Firefox)	No	Via SimpleLogin
Folder sharing	Yes (Hybrid KEM per recipient)	Limited	Yes
Open source client	Partial (MCP client, Apache-2.0)	Yes	Yes
Security audit	Planned	Yes	Yes
Password recovery	No (by design)	No (by design)	No (by design)
Passkey support	Yes (FIDO2 + PRF)	Yes	Yes
PGP support	Yes (incoming + outgoing)	No (own protocol)	Yes (OpenPGP)
GoBD-compliant email archive	Yes (SHA3-256 hash chain + Hybrid KEM)	No	No

Feature	Aionda Mail	Tuta Mail	Proton Mail
MITM detection (browser ext.)	Yes (Ed25519 signatures + TLS check)	No	No
Perfect Forward Secrecy (API)	Yes (per-request ephemeral keys)	Unknown	Unknown
Email size obfuscation	Yes (bucket padding)	Unknown	No

---

23. Limitações & fronteiras honestas

23.1 Modelo de confiança da aplicação web

Aionda Mail is a web application. On every page load, the browser downloads JavaScript from our servers. A sophisticated attacker who compromises our servers could theoretically serve modified JavaScript that exfiltrates keys.

Current mitigations:

- Subresource Integrity (SRI) hashes on all script tags
- Content Security Policy (CSP) headers restrict script sources
- All critical cryptographic code is included in the main application bundle
- **Guardian browser extension** (Section 18): Ed25519 signature verification on all API responses detects server-side tampering; TLS certificate verification (Firefox) detects MITM proxies

Planned mitigations:

- Service Worker caching for offline operation (reduces trust-on-load frequency)

23.2 Visibilidade de metadados

While email content is fully encrypted, certain metadata is visible to the server:

- When emails were received (timestamps)
- Which DEA address received the email
- Approximate email size (within bucket boundaries)
- Account activity patterns

23.3 Registo de processamento de e-mail

For diagnostic purposes, Aionda Mail includes an optional **email processing log** that can temporarily store the raw content of incoming emails. This feature is configurable per disposable email address (DEA) and can be enabled or disabled in the DEA settings (“Log email content”).

When enabled (opt-in per DEA):

- The full raw SMTP message (headers + body) is stored in plaintext on the server
- Automatic deletion after a short retention period (less than 7 days)
- Accessible only to the account owner via authenticated API

- Purpose: troubleshooting delivery issues, verifying forwarding, reviewing spam filtering decisions

When disabled:

- No email content is stored in the processing log
- Only metadata is logged (sender address, timestamp, delivery status)
- Vault encryption remains the sole storage mechanism

Important: This processing log is independent of the encrypted vault. Emails stored in the vault are always encrypted with Hybrid KEM regardless of the log setting. The processing log exists as a legacy feature from the email forwarding system and provides operational transparency. Users who require strict zero-knowledge storage for all emails should disable this option.

23.4 Segurança de e-mail externo

Emails sent to or received from non-Aionda addresses travel through the standard email infrastructure (SMTP). While stored encrypted in the vault, the email content was visible during transit unless PGP encryption was used.

23.5 Sem key escrow

Não existe chave mestra, backdoor ou mecanismo de recuperação disponível para a Aionda GmbH. Se um usuário perde a sua senha e todos os métodos de recuperação, os seus dados ficam permanentemente perdidos. Esta é uma decisão de design intencional que prova a integridade do modelo zero-knowledge.

---

24. Roteiro

Marco	Estado	Meta
Arquitetura Zero-Knowledge	Concluído	—
Hybrid KEM pós-quântica (ML-KEM-1024)	Concluído	—
Autenticação OPAQUE (RFC 9807)	Concluído	—
Shamir Secret Sharing (2 em 3)	Concluído	—
Camada de transporte API criptografada	Concluído	—
Suporte para Passkey/WebAuthn PRF	Concluído	—
Calendário criptografado de ponta a ponta	Concluído	—
Tarefas criptografadas de ponta a ponta	Concluído	—
Arquivo de e-mail conforme GoBD (Blockchain)	Concluído	—
Proteção MITM Guardian (Ed25519)	Concluído	—
Verificação de certificado TLS (Firefox)	Concluído	—

---

25. Entrar em um dispositivo por QR code

25.1 Uso e validade

Um cliente já autenticado e desbloqueado exibe **Conectar um novo dispositivo (QR code)**. O novo dispositivo escaneia o convite. Ambos exibem um código de comparação de oito

dígitos; o usuário deve compará-los e confirmar explicitamente no dispositivo existente antes da transferência. Web, iOS e macOS podem exibir o convite; o destinatário precisa oferecer suporte ao protocolo e ao seu perfil de transporte confiável.

O convite expira após **15 minutos (900 segundos)**. Esse prazo fixo é uma decisão do produto, não um padrão do setor. Consultas e novas tentativas não o prolongam. Um convite concluído não permite conectar outro dispositivo. O cancelamento ou a expiração invalida uma transferência incompleta, mas não encerra a sessão de um dispositivo que já concluiu o processo.

25.2 Conteúdo do QR e transferência criptografada

O QR `AIONDA_DEVICE_PAIRING_V2` contém um UUID de pareamento, o nome de usuário, a origem do serviço, os horários de criação e expiração, uma impressão digital SHA-256 que vincula as chaves públicas efêmeras da origem aos metadados do convite, e o perfil de transporte e a origem de autenticação. **Não contém a senha da conta, as palavras de recuperação, o token de acesso nem a chave mestra do cofre**. O nome de usuário é legível: não publique nem encaminhe a imagem do QR.

O destinatário compara a impressão digital do QR com as chaves públicas fornecidas pelo intermediário. X25519 + ML-KEM-1024 estabelece um segredo compartilhado. HKDF-SHA-256 deriva chaves separadas por função e vinculadas à transcrição do protocolo; AES-256-GCM criptografa e autentica a solicitação, a prontidão, a aprovação e o recibo. A conta, o ambiente, o destinatário e a validade ficam vinculados à troca. Uma impressão digital, vínculo de transporte ou mensagem autenticada inválida causa um erro, sem alternativa em texto simples.

Após a confirmação, a origem envia um **novo token de acesso do dispositivo e a chave mestra do cofre** no pacote de aprovação criptografado, não a senha ou as palavras de recuperação existentes. O token é registrado com OPAQUE. O servidor retransmite dados criptografados e gerencia o ciclo de vida e os registros; o destinatário descriptografa o pacote e obtém acesso real à caixa de correio. A aprovação é, portanto, sensível. Revogar o token impede autenticações posteriores, mas não apaga dados ou chaves já obtidos pelo dispositivo.

25.3 Riscos do navegador e proteções

O pareamento pela Web exibe um aviso de risco traduzido e exige uma autenticação recente: o servidor só aceita criar o convite nos 120 segundos após uma verificação OPAQUE ou passkey bem-sucedida e vinculada à conta. A caixa deve estar desbloqueada. A origem Web fica vinculada à sua sessão; o destinatário usa um perfil de autenticação fixo e confiável, não um destino arbitrário indicado no QR.

Prefira o aplicativo nativo de iOS ou macOS como origem. A criptografia de ponta a ponta protege a troca apenas quando ambos os extremos executam código confiável. Um proxy de inspeção TLS como o ZScaler, uma extensão maliciosa ou uma distribuição Web comprometida pode modificar o código e ler segredos antes da criptografia. HTTPS, o QR e códigos coincidentes não tornam seguro um extremo comprometido. O Guardian pode acrescentar verificações se estiver instalado e ativado, mas não é obrigatório nem pressuposto nesta garantia. Nunca aprove solicitações inesperadas; compare os números nos seus dois dispositivos.

26. Cliente MCP de código aberto: o protocolo, verificável

O cliente MCP do Aionda Mail é publicado como código aberto sob a **licença Apache 2.0**:

- Código-fonte: `https://github.com/AiondaDotCom/aionda-mail-mcp-client`
- Pacote: `@aiondadotcom/mail-mcp-client` no npm

Ele conecta agentes de IA à caixa de entrada por meio do Model Context Protocol. Ele roda no computador do usuário, não em nossos servidores, e contém toda a criptografia do lado do cliente de um cliente Aionda Mail. Assim, o protocolo, que de outra forma só existe dentro dos clientes, fica aberto para qualquer pessoa ler.

26.1 O que o código-fonte mostra

- **Desbloqueio:** A chave de acesso `tmv_…` nunca sai do computador. K = SHA-256(`tmv_…`) é derivada localmente. Com K, o cliente abre um envelope de 60 bytes (AES-256-GCM; os dados adicionais vinculam o UUID da chave) e obtém a chave mestra do cofre. (Nos funcionários de IA, K é a própria chave mestra; não existe envelope.) O servidor armazena apenas esse envelope e um hash da chave de API.
- **Chaves privadas:** Com a chave mestra, o cliente descriptografa localmente as chaves privadas da caixa de entrada (X25519 e ML-KEM-1024).
- **Conteúdo dos e-mails:** Assunto, remetente, destinatários, corpo, cabeçalhos, anexos e nomes de pastas chegam ao cliente como texto cifrado AES-256-GCM. A chave de um e-mail é uma chave aleatória de uso único encapsulada para as chaves públicas com a KEM híbrida (X25519 + ML-KEM-1024, combinadas via HKDF-SHA-256, capítulo 6) ou uma chave própria do e-mail HKDF-SHA-256(chave mestra, UUID do e-mail).
- **Ocultação do tamanho:** Bucket padding antes da criptografia (capítulo 14).
- **Compartilhamento:** As chaves de pasta são derivadas da chave mestra e encapsuladas para as chaves públicas dos destinatários. O cliente nunca entrega a chave mestra; ele se recusa a colocar em uma pasta compartilhada um e-mail que ainda esteja criptografado diretamente com a chave mestra.

26.2 Por que isso comprova o protocolo

1. **O servidor entrega apenas texto cifrado.** O cliente MCP recebe do servidor somente conteúdo criptografado, chaves encapsuladas e chaves públicas, e precisa descriptografar tudo sozinho. O código-fonte mostra que nem a chave de acesso, nem a chave mestra, nem nenhuma chave privada são enviadas ao servidor. Se o servidor tivesse o texto em claro, o cliente não precisaria dessa criptografia.
2. **Ponta a ponta e pós-quântica.** Nenhum e-mail pode ser aberto sem a chave privada ML-KEM-1024 do usuário. Como a ML-KEM-1024 é combinada com X25519, um atacante precisa quebrar os dois esquemas, inclusive com um futuro computador quântico.
3. **Os mesmos formatos em todos os clientes.** O aplicativo web, o aplicativo iOS/macOS, o aplicativo Android e o cliente MCP leem os mesmos dados armazenados. Vetores de teste exatos byte a byte (known-answer tests) no repositório são verificados contra o cliente web e os aplicativos Apple. Um cliente com outro esquema não conseguiria ler os mesmos e-mails.
4. **Verificável por qualquer pessoa.** Quem gravar o tráfego de rede do aplicativo web ou de um aplicativo nativo com um proxy TLS vê o mesmo texto cifrado nos mesmos campos; no aplicativo web, além disso, dentro do envelope da camada de transporte de API criptografada (capítulo 8).

5. **Procedência verificável.** Cada versão é publicada a partir do GitHub Actions com uma atestação de procedência do npm no registro público de transparência Sigstore. Um pacote instalado pode ser associado ao seu commit com `npm audit signatures`. A CI testa em Ubuntu 22.04, 24.04 e 26.04 com Node 22 e 24 e exige pelo menos 90 % de cobertura de testes.

26.3 O que ele não comprova

- O código-fonte do servidor e dos demais clientes. Em particular, um servidor comprometido poderia entregar outro código JavaScript a um navegador (seção 23.1).
- Os e-mails recebidos chegam ao servidor por SMTP e são criptografados no recebimento (seção 7.1). Os e-mails enviados precisam ser legíveis pelo servidor para serem entregues (seção 7.3).
- O que um agente de IA lê é processado em texto claro pelo provedor desse agente.

Histórico do documento

Version	Date	Changes
1.0	March 2026	Initial publication
1.1	April 2026	New chapter 10: Vault Drive (per-file-key architecture, sharing via key rewrap)
1.2	April 2026	Section 10.11: External Sharing — public share links with hybrid KEM envelopes, unlock_token flow, Argon2id password mode, URL fragment for link-only, tamper-evident audit chain (EXT_SHARE_*), and user-chosen link distribution
1.3	May 2026	New chapter 11: Aionda Chat — post-quantum E2EE real-time messaging via AAR (Aionda Async Ratchet), a hybrid X25519 + ML-KEM-1024 variant of Signal X3DH + Double Ratchet. Per-message forward secrecy, post-compromise security, and integration with the Enterprise audit chain. Subsequent chapters renumbered 12-22. PT-BR and PT-PT translations added. Fixed double-numbering bug in PDF rendering (LaTeX auto-numbering disabled; chapter numbers now sourced from headings only).

Version	Date	Changes
1.4	junho de 2026	Novo capítulo 12: Chamadas de vídeo Aionda — videoconferência em grupo E2EE pós-quântica. Acordo de chaves de grupo MLS (RFC 9420) com a suíte criptográfica `AIONDA_PQ_CALL_V1` (X-Wing = ML-KEM-768 + X25519, assinaturas ML-DSA-65), criptografia de mídia quadro a quadro AES-256-GCM SFrame (RFC 9605) com chave derivada do exportador MLS, vinculação SAS e um relé SFU de conhecimento zero. Capítulos seguintes renumerados 13-23.
1.5	julho de 2026	Novo capítulo 13: Tarefas Aionda - gerenciamento de tarefas criptografado de ponta a ponta. Chaves AES-256-GCM por tarefa e por lista, envelopadas com a chave mestra do cofre (HKDF-SHA-256 com separação de domínios específica do módulo), títulos, notas, subtarefas, nomes de listas e regras de recorrência criptografados, exposição honesta dos metadados de agendamento deliberadamente em claro, lista de e-mails sinalizados baseada na estrela já existente, separação de chaves no modo de supervisão e validação de comprimento no servidor contra o truncamento silencioso do texto cifrado. Capítulos seguintes renumerados 14-24.
1.7	13 outubro 2026	25: Entrar em um dispositivo por QR code (Web, iOS, macOS).
1.8	13 outubro 2026	3.2: Clientes nativos iOS/macOS, arquitetura Swift/SwiftUI compartilhada e limites de confiança dos componentes WebKit integrados.

Version	Date	Changes
1.9	8 novembro 2026	26: Cliente MCP de código aberto (Apache-2.0) - protocolo publicado, por que é verificável, procedência, limites. 22: linha “Open source client” atualizada.
1.10	8 novembro 2026	3.3: Cliente Android (Kotlin/Jetpack Compose, núcleo criptográfico em Rust, Android Keystore, visualização HTML protegida; Google Play e repositório F-Droid próprio). 3.4: Visão geral de todos os clientes com distribuição, onde a criptografia roda e status do código-fonte.

Contato

Aionda GmbH Stephan Ferraro Stuttgart, Germany

Email: contact-46epp9ba@contact.aionda.com Web: https://mail.aionda.com

---

Este documento descreve a arquitetura de segurança da Aionda Mail em 13 de outubro de 2026. Os sistemas criptográficos evoluem — este documento será atualizado à medida que a arquitetura mudar.