RELATÓRIO — Sistema de Comunicação Segura com RSA + AES (CBC/CTR) sobre TCP

Francisco Gustavo Martins de Sousa - 511779

1. Introdução

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema simples de comunicação segura baseado em sockets TCP e criptografia ponta a ponta.
O objetivo é demonstrar, na prática, como técnicas criptográficas modernas podem ser aplicadas para garantir confidencialidade e integridade em um ambiente de rede inseguro.

O sistema implementado utiliza:

- **RSA-OAEP** para troca de chaves de sessão
- **AES-256** nos modos **CBC** e **CTR**
- **TCP** como camada de transporte
- **Servidor store-and-forward** sem acesso ao conteúdo das mensagens
- **Clientes CLI**

2. Arquitetura Geral do Sistema

O sistema é composto por três principais módulos:

1. Servidor TCP

- Atua apenas como *roteador de mensagens*.
- Não lê plaintext.
- Armazena chaves públicas temporariamente para pareamento entre clientes.

2. Clientes

Cada cliente executa:

- Geração de chave **RSA** (2048 bits)
- Envio/recebimento de **chaves públicas**
- Geração de chave de sessão **AES (256 bits)**
- Troca de chaves cifradas via **RSA-OAEP**
- Derivação da chave final compartilhada
- Criptografia e descriptografia de mensagens **(CBC ou CTR)**

- Modo **DEBUG** opcional para análise

3. Módulo de Criptografia

- `cbc.py` — implementação manual do modo CBC usando AES básico
- `ctr.py` — implementação manual do modo CTR
- `key_exchange.py` — geração RSA, pacote OAEP, XOR final das chaves

3. Fluxo de Troca de Chaves

O protocolo criado segue estas etapas:

1. Cada cliente gera seu par RSA localmente

- 2048 bits
- Suporte a OAEP
- Chaves permanecem apenas localmente

2. Troca das chaves públicas via servidor

- O servidor apenas repassa

3. Cada cliente gera uma chave AES-256 aleatória

aes_key_local = 32 bytes

4. Cada lado cifra sua chave AES usando a chave pública do peer

Utilizando RSA-OAEP:

encrypted_key = RSA_OAEP(peer_pubkey).encrypt(aes_key_local)

5. Cada lado recebe a chave AES cifrada do peer e decifra com sua chave privada

6. Chave final é derivada via XOR

aes_final[i] = aes_local[i] XOR aes_peer[i]

Esse método garante:

- Chave final única
- Nenhum cliente sozinho controla a chave final
- Servidor não tem acesso a nenhuma parte das chaves

Validando Fluxo

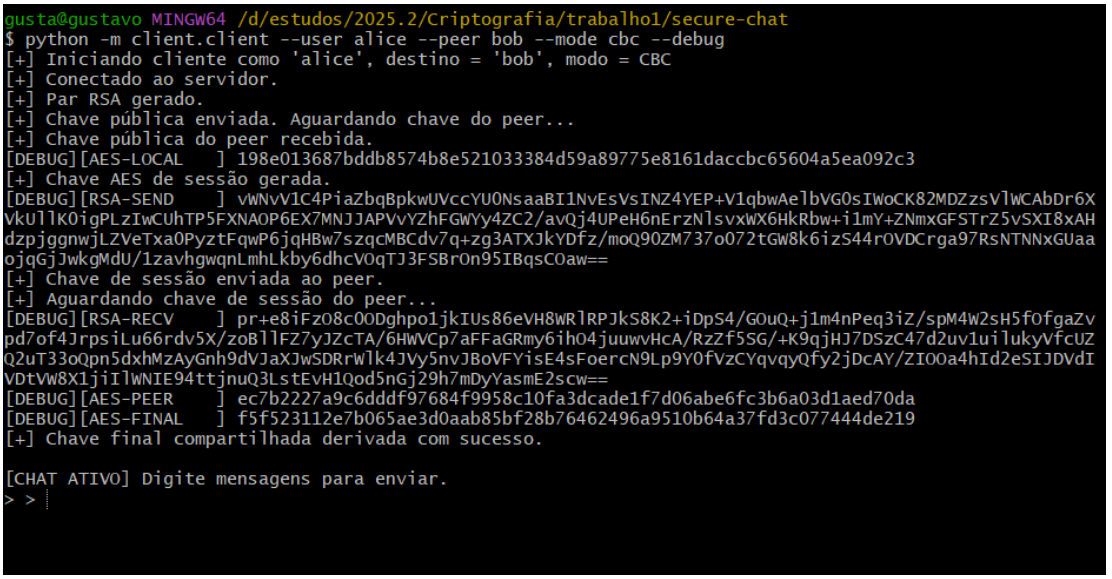
Para fins de validação e análise do funcionamento interno da criptografia, foi implementado um modo **DEBUG** acessível via o argumento `--debug` ao executar o cliente, por exemplo:

```
python -m client.client --user alice --peer bob --mode cbc --debug
```

Esse modo não altera a segurança do sistema, pois toda a informação exibida permanece apenas no terminal local do usuário. Ele serve exclusivamente para fins de auditoria e permite visualizar a geração da chave AES local, a chave recebida do peer, a derivação da chave final via XOR, além do IV/nonce e do ciphertext produzido em cada mensagem enviada.

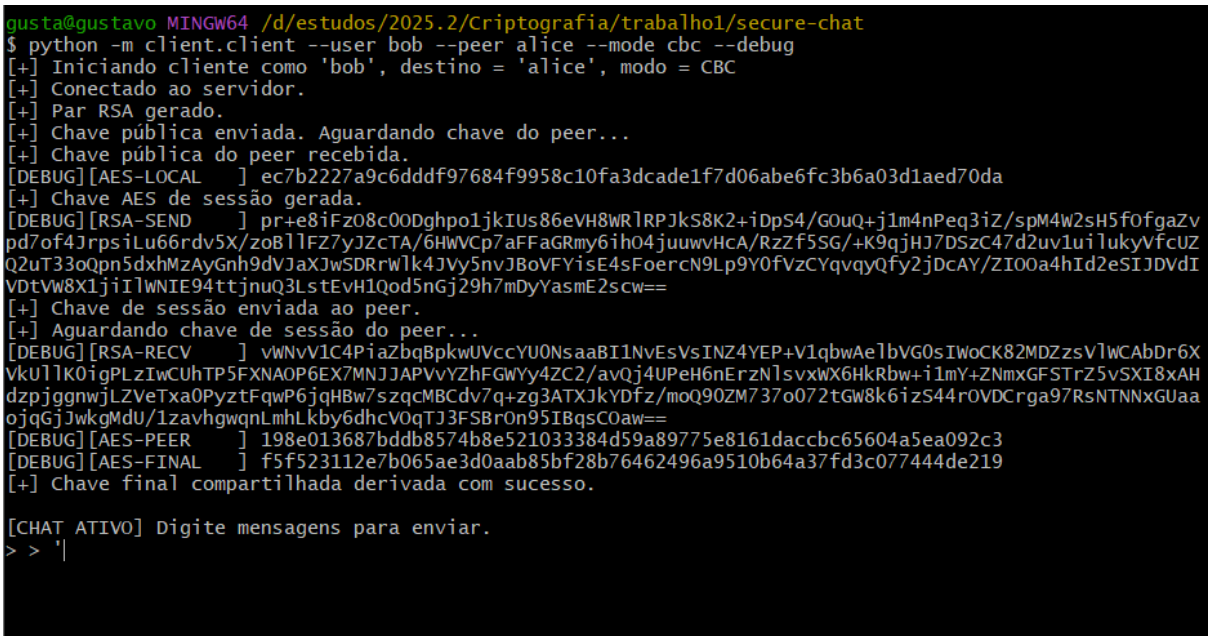
Alice em debug:

- AES-LOCAL
- RSA-SEND
- RSA-RECV
- AES-PEER
- AES-FINAL

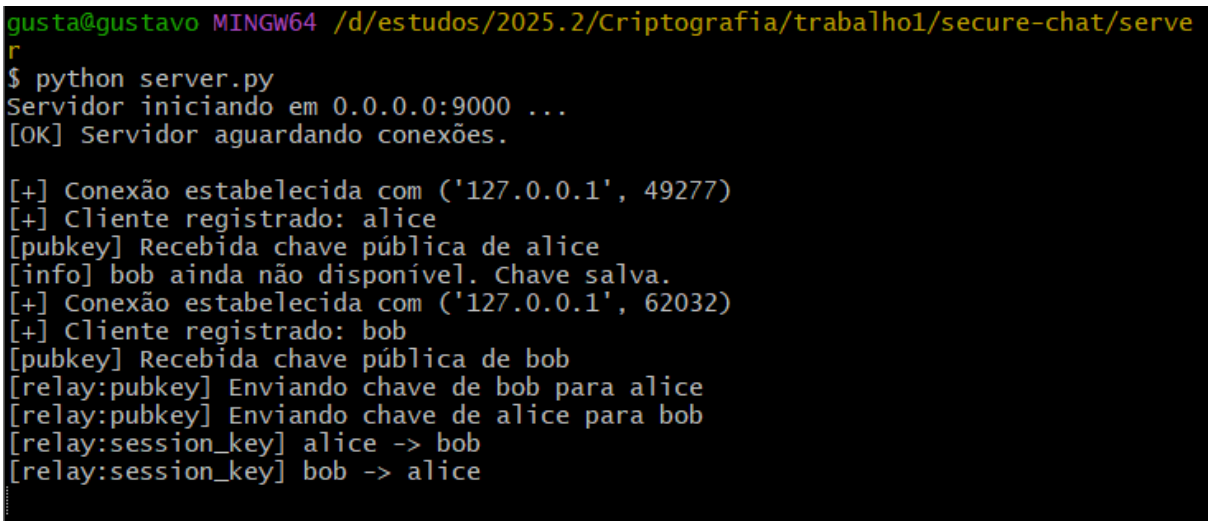


Bob em debug:

- AES-LOCAL diferente
- AES-FINAL igual à da Alice



Servidor mostrando recebimento das public keys sem conteúdo sensível.



4. Modos de Operação AES Implementados

O sistema suporta dois modos de operação:

AES-CBC (Cipher Block Chaining)

- Requer IV aleatório de 16 bytes
- Necessita de padding (PKCS#7)
- Cada bloco depende do anterior
- Repetições no plaintext não aparecem no ciphertext

AES-CTR (Counter Mode)

- Funciona como stream cipher
- Usa nonce + contador
- Não precisa de padding
- Muito rápido e paralelo

5. Funcionamento do Chat Criptografado

Após a chave final AES ser derivada:

1. O cliente cifra cada mensagem com AES-FINAL

- CBC → IV novo a cada mensagem
- CTR → nonce novo a cada mensagem

2. O servidor recebe somente:

```
{
  "mode": "cbc",
  "ciphertext": "base64...",
  "iv": "base64..."
}
```

Nada de plaintext.

3. O cliente destino descriptografa localmente.

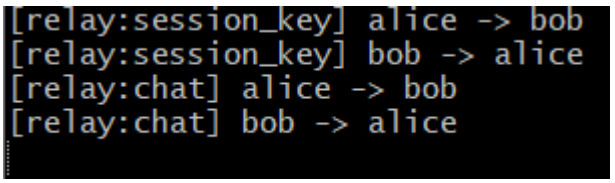
Cliente mostrando:

- PLAINTEXT
- IV
- CIPHERTEXT

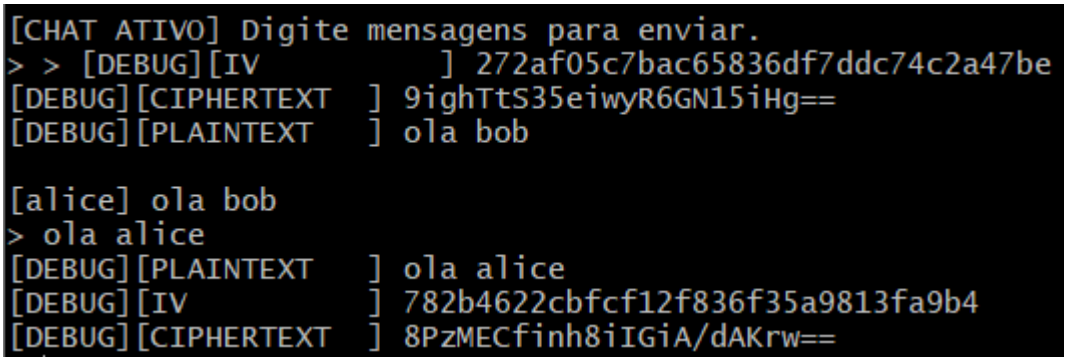
```
[CHAT ATIVO] Digite mensagens para enviar.
> > ola bob
[DEBUG][PLAINTEXT   ] ola bob
[DEBUG][IV          ] 272af05c7bac65836df7ddc74c2a47be
[DEBUG][CIPHERTEXT  ] 9ighTtS35eiwyR6GN15iHg==
> [DEBUG][IV          ] 782b4622cbfcf12f836f35a9813fa9b4
[DEBUG][CIPHERTEXT  ] 8PzMECfinh8iIGiA/dAKrw==
[DEBUG][PLAINTEXT   ] ola alice

[bob] ola alice
>
```

Servidor:



Cliente destino decodificando a mesma mensagem.



6. Como Rodar o Projeto

Para executar o sistema completo, recomenda-se utilizar **três abas/terminais** simultaneamente:

1. **Uma aba para o servidor**
2. **Duas abas para os clientes** (por exemplo, Alice e Bob)

Antes de iniciar, certifique-se de instalar a dependência necessária:

pip install pycryptodome

1. Iniciar o Servidor

Na pasta `server/`, execute:

python server.py

O servidor iniciará ouvindo na porta padrão **9000** e aguardará conexões dos clientes.

2. Iniciar o Cliente Alice

Em outra aba, na pasta raiz do projeto:

```
python -m client.client --user alice --peer bob --mode cbc
```

Parâmetros obrigatórios:

- `--user` → nome do usuário local
- `--peer` → destinatário esperado
- `--mode` → modo de operação criptográfica (`cbc` ou `ctr`)

3. Iniciar o Cliente Bob

Na terceira aba:

```
python -m client.client --user bob --peer alice --mode cbc
```

A troca de chaves será feita automaticamente, seguida pelo início da comunicação segura.

4. Ativar modo DEBUG

O modo DEBUG exibe informações internas para validação do funcionamento (chaves, IV, ciphertext etc.).
Basta adicionar o parâmetro:

```
--debug
```

Exemplo:

```
python -m client.client --user alice --peer bob --mode cbc --debug
```

7. Análise de Segurança

Pontos fortes

- Criptografia ponta a ponta verdadeira
- RSA-OAEP evita ataques clássicos

- AES-256 é seguro no contexto atual
- Cada sessão gera novas chaves
- Derivação via XOR impede controle unilateral
- Servidor nunca vê plaintext
- CBC e CTR implementados manualmente

8. Conclusão

O projeto atingiu o objetivo proposto:
Foi implementado um sistema funcional de comunicação segura utilizando criptografia moderna, de forma clara, modular e didática. A troca de chaves RSA, derivação de chave AES, operação de criptografia com CBC/CTR e transporte via TCP foram validados com testes e logs de debug.