

Trabalho Prático: Implementação e Análise *

Dhener Rosemilo Silva (DRE: 121043412)
Matheus da Cruz Percine Pinto (DRE: 121068501)

16 de novembro de 2025

*TCP vs TLS

Conteúdo

1	Introdução e Objetivos	3
2	Transmissão TCP Pura (Sem Criptografia)	3
2.1	Estabelecimento e Ciclo de Vida da Conexão	3
2.1.1	Handshake de Três Vias e Overhead Temporal	3
2.1.2	Transmissão e Encerramento (Quatro Vias)	4
2.2	Análise da Exposição de Dados (Vulnerabilidade)	4
3	Funcionamento do TLS (Transport Layer Security)	5
3.1	O Processo de Handshake	5
3.2	Criptografia de Dados e Transferência Segura	11
3.2.1	Ativação da Camada TLS no Código-Fonte	11
3.2.2	Algoritmo e Evidência na Rede	12
4	Comparação de Implementações: Segurança e Evidências	13
4.1	1. Confidencialidade (O Conteúdo dos Dados)	13
4.1.1	Transmissão Sem TLS (TCP Puro)	13
4.1.2	Transmissão Com TLS	14
4.2	2. Integridade e Autenticidade	15
5	Análise e Discussão do Overhead (Custo do TLS)	15
5.1	Definição das Métricas de Desempenho	15
5.2	Dados Quantitativos do Overhead	16
5.3	Análise Detalhada das Causas do Overhead	16

1 Introdução e Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo principal desenvolver e analisar a implementação de um sistema de transferência de arquivos utilizando dois protocolos distintos: o **TCP (Transmission Control Protocol)** e o **TLS (Transport Layer Security)** sobre o TCP.

Para isso, foi criado um programa cliente capaz de enviar um arquivo de texto para um servidor em ambas as formas de transmissão. Esse envio deve ser realizado:

- **Sem TLS:** Transmissão em texto plano (não criptografada).
- **Com TLS:** Transmissão utilizando criptografia para garantir a segurança.

Após isso, as diferenças de segurança e desempenho introduzidas pelo uso do TLS serão analisadas e comparadas, com base em evidências de captura de pacotes de rede e métricas de *overhead temporal*.

2 Transmissão TCP Pura (Sem Criptografia)

A transmissão em texto plano (TCP Puro) serve como o **ponto de contraste** crucial para a análise de segurança e desempenho. Sua simplicidade resulta em alta velocidade, mas expõe totalmente o conteúdo da comunicação.

2.1 Estabelecimento e Ciclo de Vida da Conexão

A conexão TCP é estabelecida de forma minimalista, focando apenas na confiabilidade do canal de transporte.

2.1.1 Handshake de Três Vias e Overhead Temporal

O estabelecimento de uma conexão TCP é caracterizado pela sua eficiência através do **handshake de três vias** (SYN, SYN-ACK, ACK)(pacotes 39 a 41 da imagem).

- **Baixa Latência Inicial:** Este processo é extremamente rápido, pois não envolve troca de certificados ou cálculos criptográficos.
- **Contraste com TLS:** Esta eficiência justifica o grande **overhead temporal** medido no TLS, que exige múltiplos passos e cálculos de chave antes de iniciar a transmissão de dados.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
39	9.357953	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	68	59815 → 59815 [SYN] Seq=8 Win=5535 Len=64 TSval=10344 Lmtd=10344 Tscrel=23252838 Thresh=8 SACK_PERM
40	9.357918	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	68	59815 → 64832 [SYN, ACK] Seq=9 Ack=1 Win=5535 Len=64 TSval=10344 Lmtd=10344 Tscrel=148168598 Thresh=8 SACK_PERM
41	9.357953	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	56	64835 → 59815 [ACK] Seq=1 Ack=64832 Win=48328 Len=8 TSval=13322808 Tscrel=148168598 Thresh=8 SACK_PERM
42	9.357974	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	56	59815 → 64835 [ACK] Seq=1 Ack=64832 Win=48328 Len=8 TSval=13322808 Tscrel=148168598 Thresh=8 SACK_PERM
43	9.357974	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	71	64835 → 59815 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=64832 Win=13 Len=15 TSval=13322808 Tscrel=148168598 Thresh=8 SACK_PERM
44	9.357918	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	56	59815 → 64835 [ACK] Seq=2 Ack=64832 Win=48328 Len=8 TSval=148168598 Tscrel=23252838 Thresh=8 SACK_PERM
45	9.357944	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	496	64835 → 59815 [ACK] Seq=2 Ack=64832 Win=48328 Len=8 TSval=148168598 Tscrel=23252838 Thresh=8 SACK_PERM
46	9.357944	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	56	59815 → 64835 [ACK] Seq=1 Ack=64832 Win=48328 Len=8 TSval=148168598 Tscrel=233252938 Thresh=8 SACK_PERM
47	9.358044	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	98	59815 → 64835 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=64832 Win=48328 Len=15 TSval=148168598 Tscrel=233252938 Thresh=8 SACK_PERM
48	9.358044	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	56	64835 → 59815 [ACK] Seq=2 Ack=64832 Win=48328 Len=8 TSval=148168598 Tscrel=233252938 Thresh=8 SACK_PERM
49	9.358548	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	56	64835 → 59815 [ACK] Seq=916 Ack=35 Win=48328 Len=8 TSval=233252839 Tscrel=148168591 Thresh=8 SACK_PERM
50	9.358559	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	56	64835 → 59815 [ACK] Seq=916 Ack=35 Win=48328 Len=8 TSval=233252839 Tscrel=148168591 Thresh=8 SACK_PERM
51	9.358559	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	56	59815 → 64835 [ACK] Seq=916 Ack=35 Win=48328 Len=8 TSval=233252839 Tscrel=148168591 Thresh=8 SACK_PERM
52	9.358652	127.0.0.1	232.252.208.1	TCP	56	59815 → 64835 [ACK] Seq=38 Ack=917 Win=483456 Len=8 TSval=148168591 Tscrel=23252839 Thresh=8 SACK_PERM

Figura 1: Captura do Handshake TCP puro.

2.1.2 Transmissão e Encerramento (Quatro Vias)

A transferência de dados de aplicação (pacotes PSH, ACK) é seguida por um encerramento ordenado:

- **Fechamento da Conexão:** O término da sessão é realizado através de um **handshake de quatro vias**, onde o cliente e o servidor enviam, cada um, um pacote FIN (Finish) e recebem um ACK (Acknowledgement) de confirmação.
- **Sequência no Wireshark:** O pacote FIN inicial (Pacote 48) e o ACK de confirmação (Pacote 49) marcam a intenção do cliente de fechar, seguido pelo FIN do servidor (Pacote 51) e o ACK final do cliente (Pacote 52).

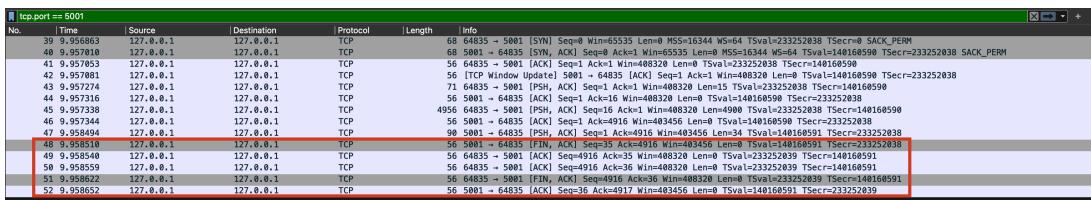


Figura 2: Captura do encerramento de quatro vias (FIN/ACK).

2.2 Análise da Exposição de Dados (Vulnerabilidade)

Em contraste com a robustez do TLS, a comunicação TCP pura falha no requisito fundamental de segurança.

- **Vulnerabilidade à Leitura:** A ausência de qualquer camada criptográfica significa que o *payload* do pacote TCP (a camada **Data**) contém os dados do arquivo em texto plano.
- **Evidência da Exposição:** A captura de pacote mostra claramente o conteúdo do arquivo na camada de dados em formato legível, comprovando a total ausência de segurança e falha de **Confidencialidade**.

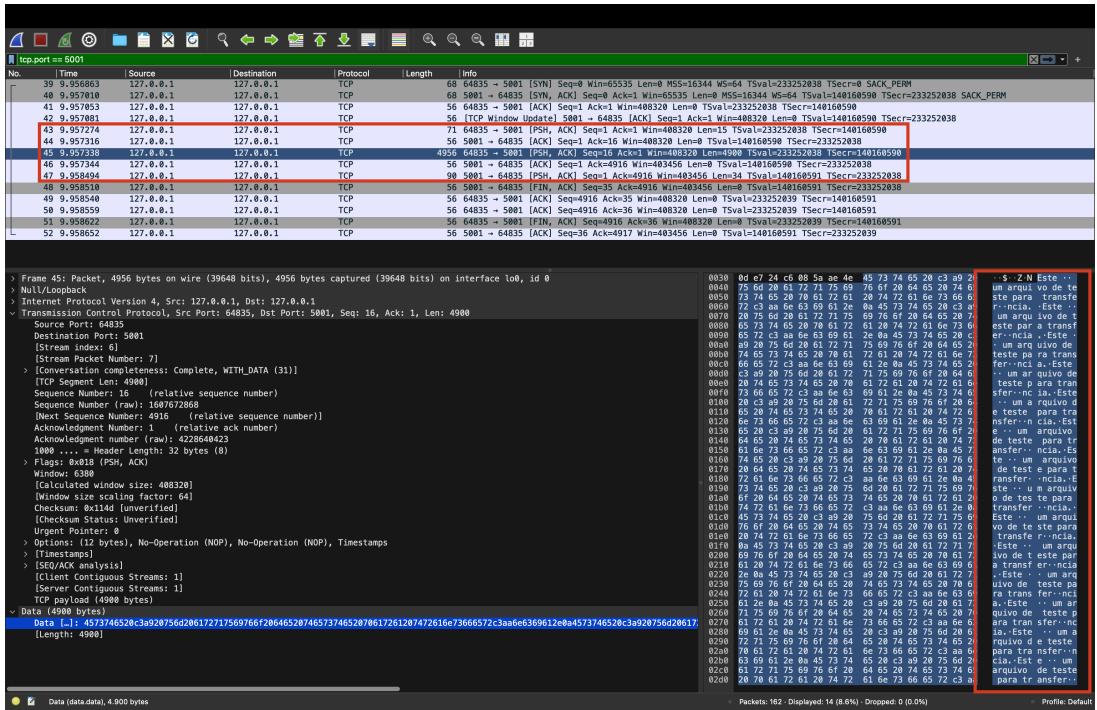


Figura 3: Captura de pacote Wireshark mostrando a transmissão de dados em texto plano (TCP puro). Note a visibilidade do conteúdo na camada de dados.

3 Funcionamento do TLS (Transport Layer Security)

O TLS é um protocolo criptográfico que opera na camada de transporte, oferecendo segurança, integridade e autenticidade sobre uma rede. Seu objetivo é aprimorar o TCP através da criptografia. Ele é o sucessor do SSL e estabelece uma comunicação segura em duas fases: a negociação (*Handshake*) e a transferência de dados cifrados.

3.1 O Processo de Handshake

O **Handshake TLS** é a etapa inicial onde cliente e servidor negociam e estabelecem os parâmetros de segurança para a sessão. Usado antes que quaisquer dados da aplicação sejam transmitidos. Permite que o Servidor e o Cliente se autentiquem mutuamente (especialmente o servidor ao cliente), negociem um algoritmo de **criptografia**, um algoritmo de **MAC** (integridade) e as **chaves criptográficas** a serem usadas para proteger os dados. Esse protocolo é dividido em 4 fases:

- Fase 1 (Client Hello + Server Hello):** Nessa fase há o estabelecimento das capacidades de segurança, incluindo versão do protocolo, ID da sessão, Cipher Suite, Método de compressão e números aleatórios iniciais.

Client Hello: O cliente inicia o *handshake* enviando esta mensagem `client_hello` para informar ao servidor suas capacidades de segurança e iniciar a negociação. Os parâmetros do `client_hello` são:

- Versão:** É a versão mais alta do TLS que o cliente entende.
- Cifras Suportadas:** Envia a lista de algoritmos de cifras (*Cipher Suites*) suportadas e em ordem decrescente de preferência. Cada item define o algoritmo

de troca de chave e um CipherSpec (algoritmo de cifra/MAC). O servidor usará esta lista para escolher o conjunto criptográfico a ser usado na sessão.

- **Client Random:** Uma estrutura aleatória gerada pelo cliente. Sua composição é 32-bit timestamp + 28 bytes aleatórios (de um gerador seguro). Usado para prevenir ataques de replay.
- **ID de Sessão (Session ID):** Este campo é usado para o mecanismo de Retomada de Sessão (*Session Resumption*).
 - Um comprimento de **zero** (como visto no seu teste) indica que o cliente está iniciando um *Handshake Completo*, que exige mais processamento.
 - Um valor diferente de zero indicaria uma tentativa de retomar uma sessão anterior, o que otimiza o processo e reduz o *overhead*.
- **Extensões (Extensions):** São campos adicionais que expandem a funcionalidade do TLS. As mais relevantes são:
 - **server_name (SNI):** Permite ao cliente informar qual nome de domínio ele está tentando acessar, útil para servidores que hospedam múltiplos sites (virtual hosting).
 - **supported_groups:** O cliente lista as curvas elípticas (x25519) ou grupos Diffie-Hellman que ele aceita. O servidor escolherá um para realizar o cálculo de Troca de Chaves (ECDHE).

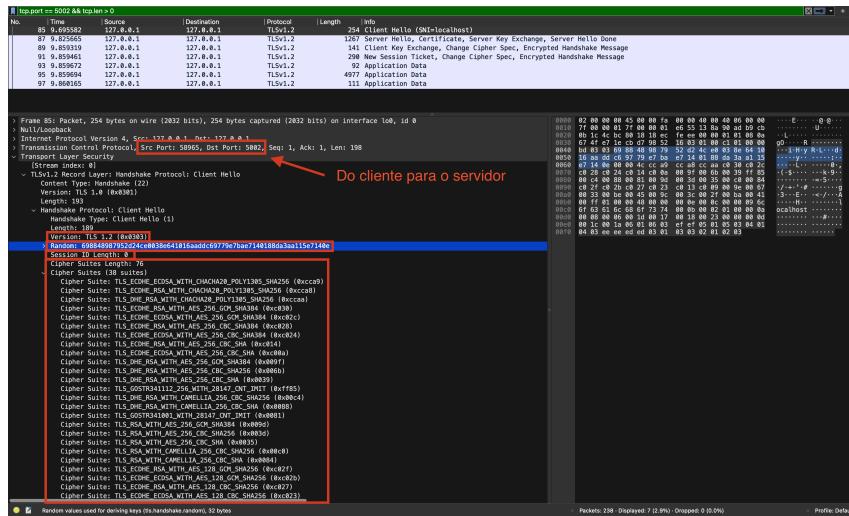


Figura 4: Captura do Client Hello no Wireshark na Transmissão TLS - Parte 1.

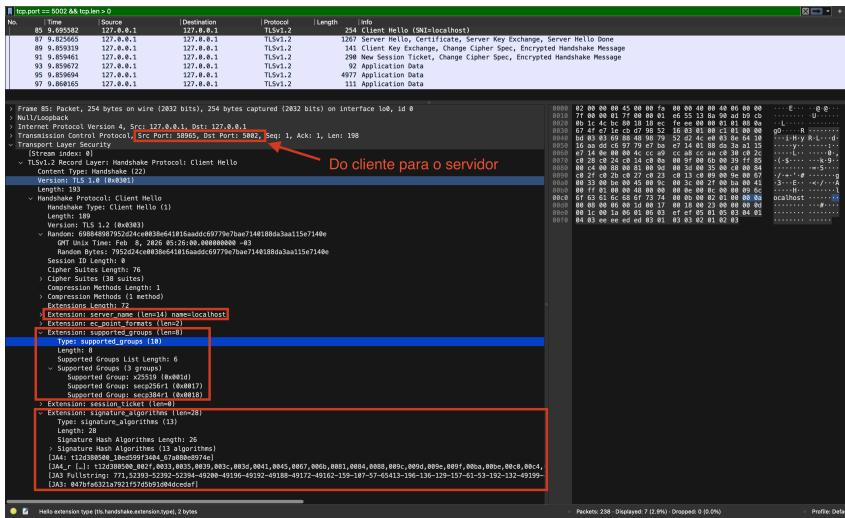


Figura 5: Captura do Client Hello no Wireshark na Transmissão - TLS Parte 2.

Server Hello: O servidor responde com uma mensagem server_hello. Os parâmetros do server_hello são:

- Contém os mesmos parâmetros do client_hello.
- Campo **Cipher Suite:** Escolhe a cipher suite que será usada.
- Campo **Random:** Número aleatório do servidor
- Campo **Session ID:** Confirma que o servidor aceitou a versão proposta, que foi TLS 1.2 no caso.

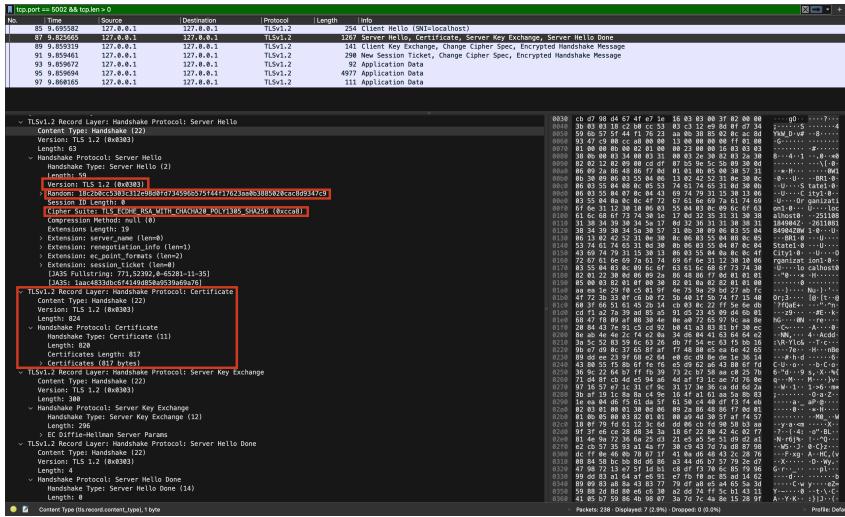


Figura 6: Captura do Server Hello e Certificate no Wireshark na Transmissão TLS.

2. Fase 2 (Autenticação do Servidor): O servidor envia seu certificado e (possivelmente) informações de chave. Termina com Server Hello Done. O servidor envia após o server_hello:

- Certificado (campo **Certificate:**) No caso o certificado autoassinado server.crt que foi gerado, conforme o código server.py

- Informação da chave **Server Key Exchange**: (Opcional) Envia informações adicionais da chave como o método avançado **ECDHE** (*Elliptic Curve Diffie-Hellman Ephemeral*), garantindo o **Perfect Forward Secrecy (PFS)**. Este processo de troca de chaves cumpre três funções cruciais:
 - (a) **Derivação e Algoritmo**: O campo EC Diffie-Hellman Server Params confirma o uso do ECDHE, que permite que o cliente e o servidor **derivem** a *Chave Pré-Mestra* de forma independente, sem trocá-la de forma criptografada.
 - (b) **Curva e Chave Pública Efêmera**: O servidor especifica a curva elíptica moderna x25519 (campo **Named Curve**) e envia sua **chave pública temporária** (**Pubkey**). Esta chave é usada apenas nesta sessão e será descartada, sendo a base do PFS.
 - (c) **Autenticidade**: A chave pública efêmera e seus parâmetros são digitalmente **assinados** pelo servidor (campo **Signature**), utilizando a chave privada de longo prazo vinculada ao certificado. O cliente verifica essa assinatura, garantindo que a troca de chaves é autêntica e veio do servidor correto.
- Solicitação do certificado do cliente (CertificateRequest):
 - (a) (Opcional) O servidor pode solicitar um certificado do cliente para autenticação mútua.
- Fim da mensagem (Server Hello Done):
 - (a) Sempre obrigatória
 - (b) Indica o fim do "olá" do servidor e mensagens associadas
 - (c) Após enviar, o servidor aguarda a resposta do cliente.

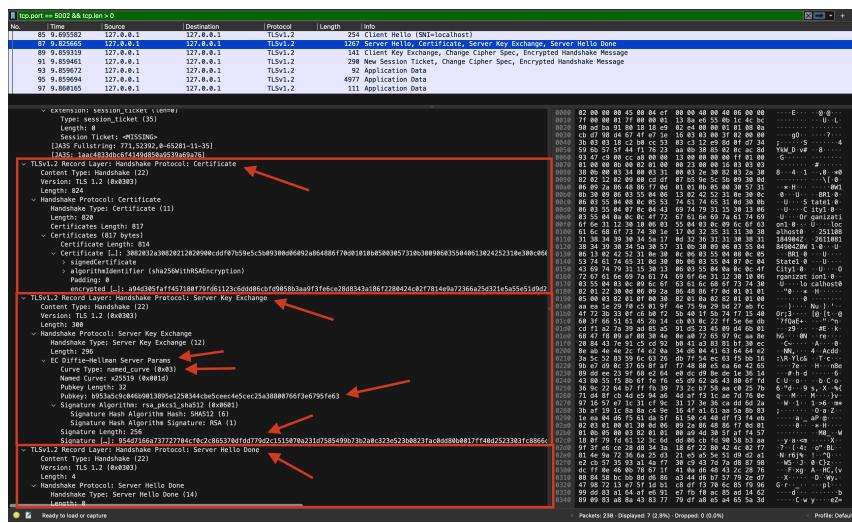


Figura 7: Captura do Server Hello para troca de chaves na Transmissão TLS.

3. **Fase 3 (Resposta do cliente):** O cliente envia seu certificado, caso solicitado, a troca de chave e pode enviar a verificação do certificado. Após receber o `server_done` do servidor:

- Verificação (Ações do cliente):

- (a) O cliente deve verificar se o servidor forneceu um certificado válido (se foi exigido).
- (b) O cliente deve checar se os parâmetros do server hello (CipherSuite, etc.) são aceitáveis.
- Envio de Mensagens (Ações do cliente):
 - (a) Se tudo estiver satisfatório, o cliente envia uma ou mais mensagens ao servidor.
 - (b) (Ex: ClientKeyExchange - contendo o "pre-master secret" criptografado com a chave pública do servidor).
 - (c) (Ex: CertificateVerify - se o servidor solicitou um certificado do cliente e o cliente está respondendo).

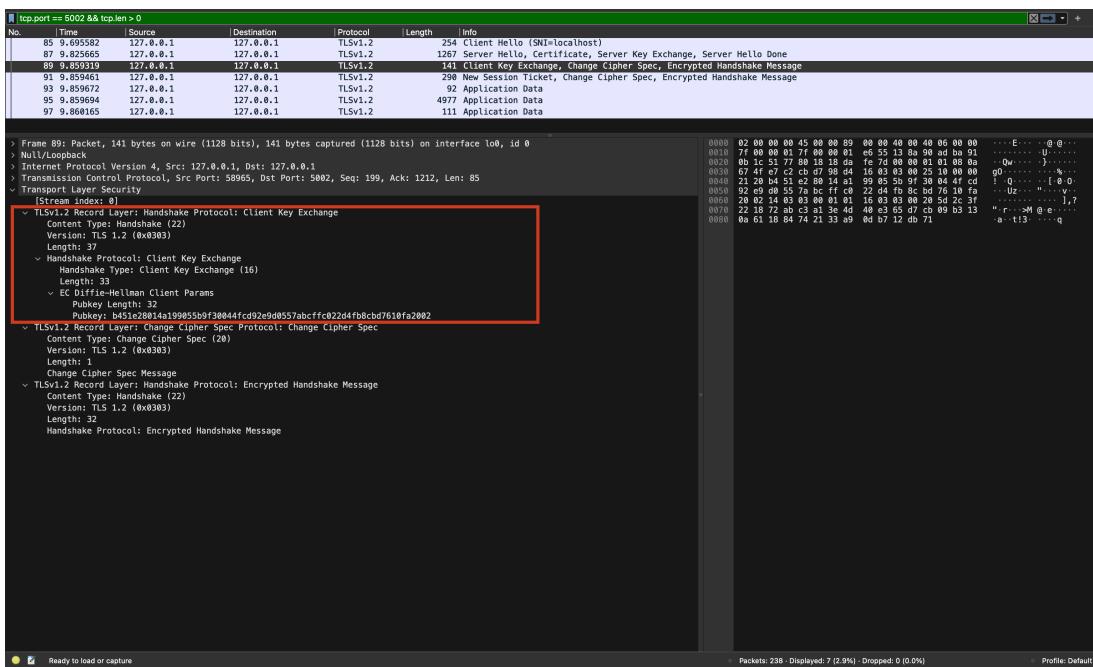


Figura 8: Captura do Client Key Exchange na Transmissão TLS.

4. Fase 4 (Finalização - Ativação): Trocas do Cipher Suite entre servidor e cliente e finaliza o Protocolo Handshake.

- Ação do cliente:
 - (a) Envia a mensagem change_cipher_spec. (Esta mensagem usa o Change Cipher Spec Protocol, não o Handshake Protocol).
 - (b) Ação: Copia o CipherSpec pendente (negociado) para o CipherSpec atual (em uso).
 - (c) Imediatamente, envia a mensagem finished.
 - A mensagem finished já é enviada usando os novos algoritmos, chaves e segredos.
 - A finished verifica se a troca de chaves e a autenticação foram bem-sucedidas.

- Ação do servidor (em resposta):
 - (a) Envia sua própria mensagem change_cipher_spec.
 - (b) Transfere o CipherSpec pendente para o atual.
 - (c) Envia sua própria mensagem finished (também já criptografada).
 - Conclusão:
 - (a) Neste ponto, o handshake está completo.
 - (b) Cliente e servidor podem começar a trocar dados da camada de aplicação (HTTP) de forma segura.
5. **Change Cipher Spec:** Ambas as partes sinalizam que toda a comunicação subsequente será cifrada usando a chave de sessão recém-gerada. Essa mensagem, por si só, não contém dados de criptografia. Sua função é puramente sinalizadora. Ela é como um interruptor, dizendo à parte receptora: "A partir do próximo pacote que você receber, comece a usar as chaves secretas que acabamos de negociar."

- O cliente envia primeiro, sinalizando que ele está pronto para usar as chaves de sessão recém-derivadas para cifrar a próxima mensagem. Rótulo do Pacote (Client → Server): TLSv1.2 Record Layer: Change Cipher Spec

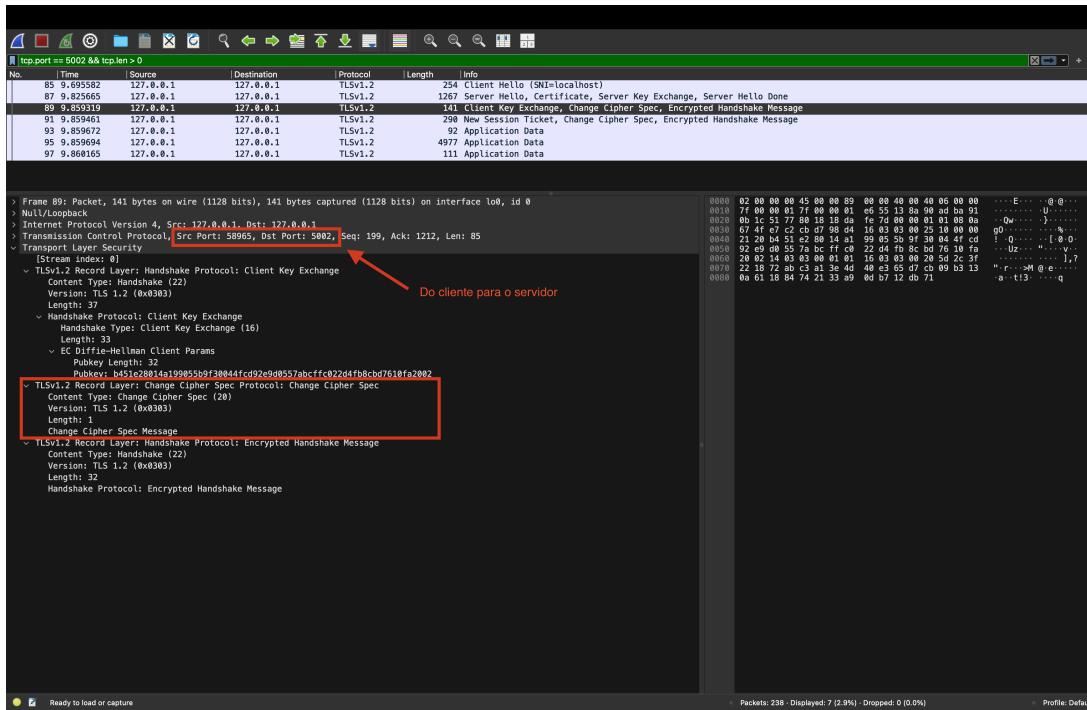


Figura 9: Captura do Change Cipher Spec do cliente para o servidor na Transmissão TLS.

- O servidor envia sua própria mensagem Change Cipher Spec em resposta, confirmado que ele também está ativando as chaves de sessão simétricas. Rótulo do Pacote (Server → Client): TLSv1.2 Record Layer: Change Cipher Spec Protocol: Change Cipher Spec

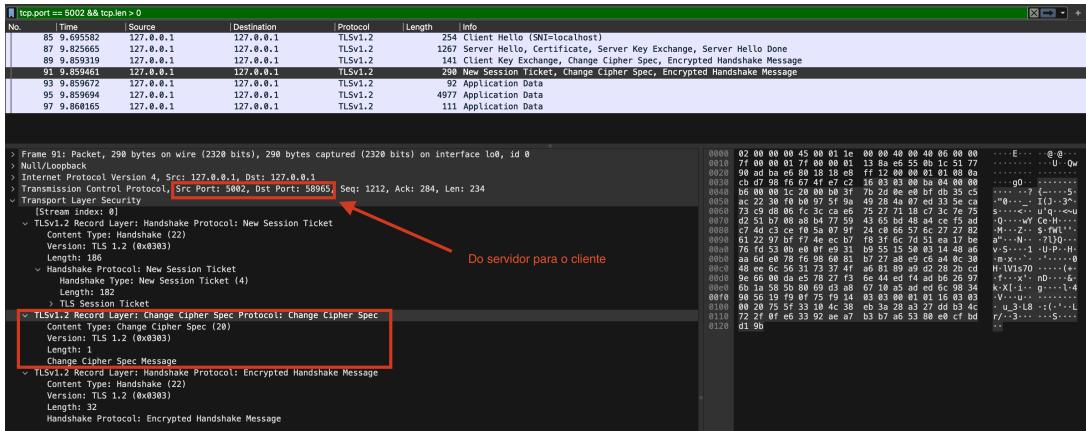


Figura 10: Captura do Change Cipher Spec do servidor para o cliente na Transmissão TLS.

Este processo complexo garante a autenticidade do servidor e o sigilo na negociação da chave.

3.2 Criptografia de Dados e Transferência Segura

Uma vez que o *handshake* é concluído e a **Chave de Sessão Simétrica** é estabelecida, a comunicação de dados prossegue no protocolo de registro TLS (TLS Record Protocol). Esta fase é crucial para garantir a **Confidencialidade** e a **Integridade** dos dados transferidos.

3.2.1 Ativação da Camada TLS no Código-Fonte

No lado do cliente, a criptografia é ativada envolvendo um *socket* TCP base com uma camada SSL/TLS, utilizando o módulo padrão `ssl` do Python.

O trecho de código no `client.py` demonstra a criação do contexto e o envolvimento do *socket*:

```

def connect_tls(self, certfile: Optional[str] = None) -> bool:
    """Estabelece conexão TCP com TLS"""
    try:
        # Cria socket base
        base_socket = self._create_socket()

        # Configura contexto SSL/TLS
        context = ssl.create_default_context(ssl.Purpose.SERVER_AUTH)

        # Para ambiente de desenvolvimento (aceita certificados auto-assinados)
        context.check_hostname = False
        context.verify_mode = ssl.CERT_NONE

        # Envolve o socket com TLS
        self.socket = context.wrap_socket(
            base_socket,
            server_hostname=self.host
        )

        print(f"[TLS] Conectando a {self.host}:{self.port}...")
        self.socket.connect((self.host, self.port))

        # Exibe informações da conexão TLS
        cipher = self.socket.cipher()
        version = self.socket.version()
        print(f"[TLS] Conexão estabelecida com sucesso!")
        print(f"[TLS] Protocolo: {version}")
        print(f"[TLS] Cipher: {cipher[0]}")

        return True
    except Exception as e:
        print(f"[ERRO] Falha na conexão TLS: {e}")
        return False

```

Figura 11: Captura de parte do client.py do método connect_tls.

Após o sucesso do `context.wrap_socket`, qualquer chamada subsequente ao método `send()` neste `socket` automaticamente cifra os dados antes da transmissão.

3.2.2 Algoritmo e Evidência na Rede

A segurança na transferência ocorre pelos seguintes mecanismos, que podem ser verificados nas capturas de pacotes:

- **Criptografia Simétrica (Confidencialidade):** O algoritmo de cifragem simétrica é o responsável por codificar os dados.
 - **Algoritmo Negociado:** O *Server Hello* confirmou o uso do conjunto de cifras `TLS_ECDHE_RSA_WITH_CHACHA20_POLY1305_SHA256`. Isso estabelece que a criptografia de dados é realizada pelo algoritmo **ChaCha20** (cifra de fluxo moderna).
 - **Evidência:** Os pacotes de dados são identificados como `Application Data` e o seu *payload* contém *bytes* cifrados, confirmando que o ChaCha20 está ativo.

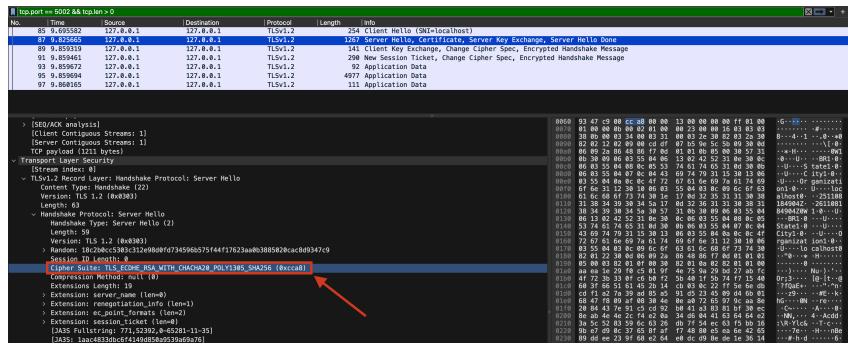


Figura 12: Captura do Server Hello do campo cipher_suite.

- **Integridade (MAC/Tag de Autenticação):** Cada registro TLS é protegido contra adulteração.

- A cifra ChaCha20 é emparelhada com o **Poly1305** (do conjunto de cifras negociado), formando um algoritmo de *cifra autenticada* (AEAD).
- O Poly1305 gera um *Authentication Tag* para cada bloco de dados. O receptor verifica essa *tag*, garantindo a **Integridade** e a autenticidade dos dados do arquivo.

4 Comparação de Implementações: Segurança e Evidências

A comparação entre as implementações sem e com TLS é fundamental para demonstrar o valor da criptografia em redes. Esta seção contrasta os protocolos com base nas garantias de segurança e utiliza as capturas de pacotes de rede (Wireshark) como evidência empírica.

4.1 1. Confidencialidade (O Conteúdo dos Dados)

4.1.1 Transmissão Sem TLS (TCP Puro)

Na implementação sem TLS (porta 5001), o protocolo TCP puro não adiciona nenhuma camada de segurança, e a transmissão ocorre em **texto plano**.

- **Análise:** A captura de pacotes (Figura 13) mostra o conteúdo literal do arquivo de teste ("Este é um arquivo de teste...") visível no *payload* do segmento TCP.
- **Conclusão:** A confidencialidade é **nula**. Qualquer *sniffing* na rede expõe os dados.

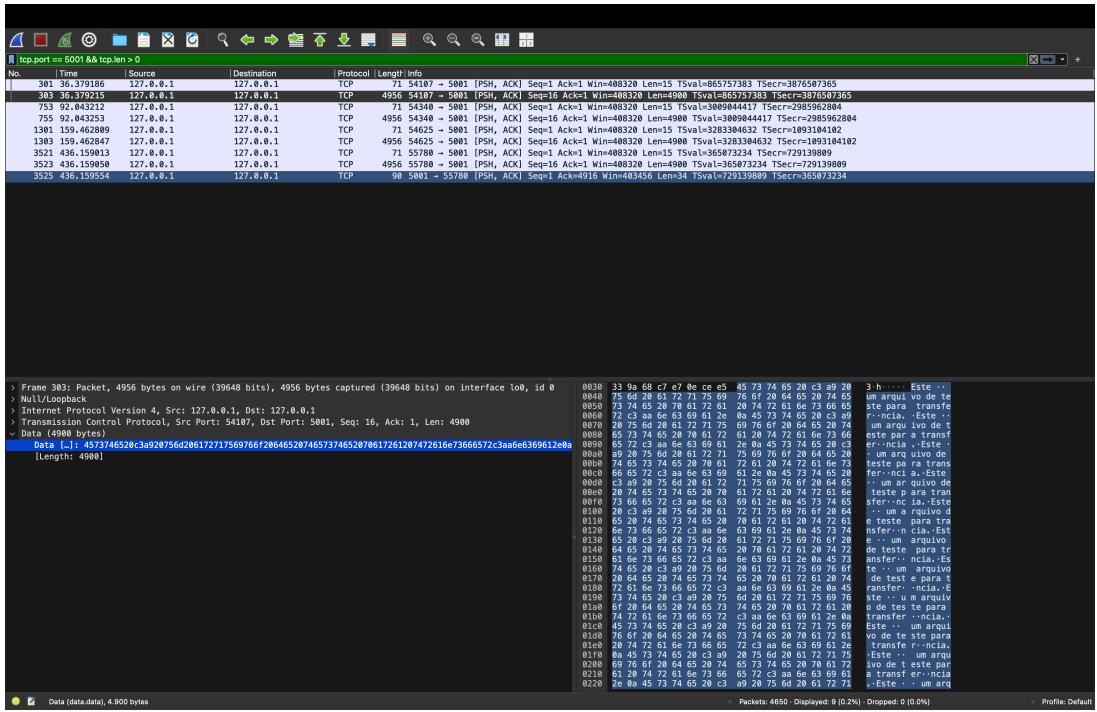


Figura 13: Evidência de Texto Plano (TCP Puro). Conteúdo visível no payload.

4.1.2 Transmissão Com TLS

Na implementação com TLS (porta 5002), a chave de sessão secreta (negociada no *handshake*) é usada para criptografar o arquivo antes do envio.

- **Análise:** A captura (Figura 14) mostra que o tráfego de dados é categorizado como **TLSv1.2 Record Layer: Application Data**. O *payload* contém apenas sequências ilegíveis de bytes cifrados.
- **Conclusão:** A confidencialidade é garantida, pois os dados estão protegidos contra interceptação.

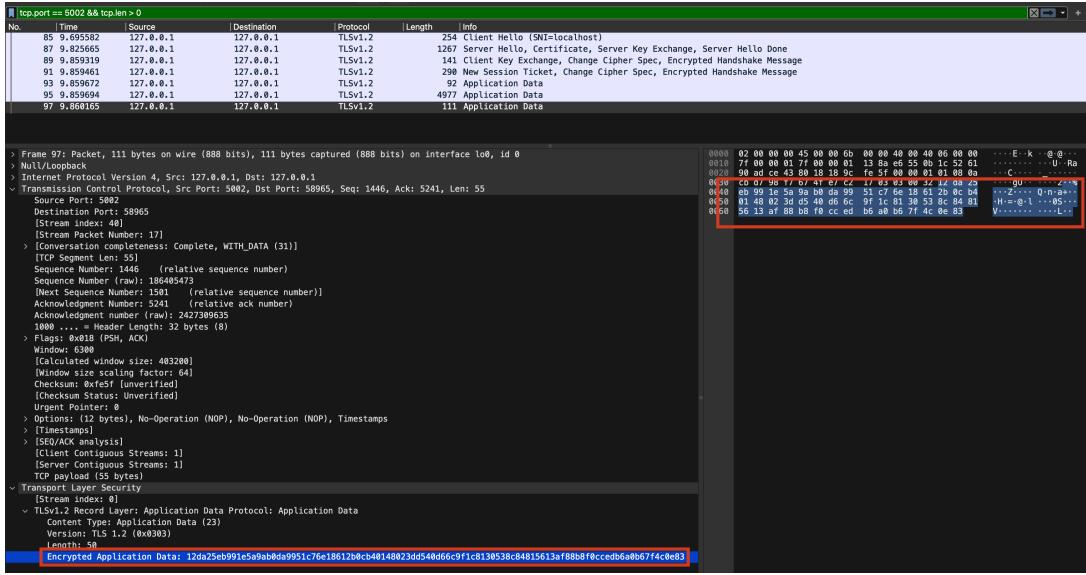


Figura 14: Evidência de Envio Cifrado (TLS). Payload ilegível (Encrypted Application Data).

4.2 2. Integridade e Autenticidade

Garantia de Segurança	TCP Puro (Sem TLS)	TLS
Autenticidade (Identidade)	Nenhuma	Garantida (via Certificado Digital)
Integridade (Anti-adulteração)	Nenhuma	Garantida (via MAC/Hash)

Tabela 1: Comparaçāo de Mecanismos de Segurança

- Autenticidade:** Na implementação TCP, não há verificação de identidade; o cliente aceita a conexão de qualquer servidor na porta 5001. No TLS, o servidor envia seu certificado digital para provar sua identidade durante o *handshake*, impedindo ataques *Man-in-the-Middle*.
- Integridade:** O TCP usa apenas um *checksum* básico. O TLS, por outro lado, anexa um **Message Authentication Code (MAC)** criptográfico a cada registro de dados, garantindo que o pacote não foi alterado intencionalmente no caminho.

5 Análise e Discussão do Overhead (Custo do TLS)

O uso do TLS, embora indispensável para garantir confidencialidade e integridade, introduz um custo de desempenho conhecido como *overhead*. Este custo é a consequência direta do trabalho criptográfico exigido pelo protocolo. Esta seção analisa o impacto quantitativo do TLS comparado ao TCP puro, utilizando os dados coletados através do `performance_analyzer.py`.

5.1 Definição das Métricas de Desempenho

Para quantificar o impacto, foram coletadas as seguintes métricas, que contrastam o desempenho da transferência em texto plano (TCP) e cifrada (TLS):

- **Tempo Médio:** O tempo total gasto, em segundos, desde o estabelecimento da conexão até a conclusão da transferência do arquivo. No TLS, esta métrica inclui o tempo do *handshake* e o tempo de criptografia/descriptografia dos dados.
- **Throughput Médio (Vazão):** A taxa de transferência efetiva de dados, medida em megabytes por segundo (MB/s). É calculada dividindo o tamanho do arquivo pelo tempo de transferência. O *throughput* é inversamente proporcional ao *overhead* de tempo.
- **Fator de Desaceleração:** Um multiplicador que indica quantas vezes o processo com TLS é mais lento que o processo sem criptografia (TCP Puro). Um fator de 2.22x, por exemplo, significa que o TLS leva 2.22 vezes mais tempo.
- **Impacto / Overhead:** A variação percentual que o TLS introduziu na métrica. Um *overhead* de tempo de **+121.95%** significa que o tempo de transferência aumentou 121.95%. Uma redução de *throughput* de **-69.04%** indica que a vazão caiu quase 70%.

5.2 Dados Quantitativos do Overhead

As métricas foram coletadas através de 10 testes para cada protocolo, utilizando o script `performance_analyzer.py`. Os resultados médios (Tabela 2) demonstram a diferença de eficiência.

Tabela 2: Comparação Quantitativa de Desempenho (Média de 10 Testes)

Métrica	TCP Puro	TLS	Impacto / Overhead
Tempo Médio	0.000129s	0.000286s	+121.95%
Throughput Médio	520.84 MB/s	161.28 MB/s	-69.04%
Fator de Desaceleração	1.00x	2.22x	TLS é 2.22x mais lento

5.3 Análise Detalhada das Causas do Overhead

O *overhead* de tempo de **121.95%** e a consequente **redução de 69.04% no throughput** são atribuídos a fatores que consomem ciclos da CPU e introduzem latência de rede.

1. **Latência do Handshake Inicial:** O processo de negociação de cifras, troca de chaves (ECDHE) e autenticação de certificado (RSA) é executado antes que o primeiro *byte* de dado do arquivo seja transmitido. Este *handshake* exige múltiplas trocas de mensagens (*Round-Trip Times*), consumindo o tempo inicial e impactando diretamente o **Tempo Médio** total, especialmente em transferências de arquivos pequenos.
2. **Criptografia e Descriptografia Contínua (Overhead de CPU):** O custo mais significativo no *throughput* é introduzido pela execução dos algoritmos criptográficos (ChaCha20-Poly1305 no seu caso). Cada bloco de dados enviado exige que o cliente o cifre e que o servidor o decifre, consumindo ciclos da CPU em tempo real durante toda a transferência. Esse gasto computacional prolonga o **Tempo Médio** de forma linear ao tamanho do arquivo.

3. Processamento de Integridade e Overhead de Tamanho: O TLS não apenas cifra, mas também garante a integridade e a autenticidade. O cálculo e a inclusão do *Authentication Tag* (Poly1305), juntamente com o cabeçalho do protocolo de registro TLS, adicionam um *overhead* de tamanho a cada pacote. Os dados do teste indicam um **overhead médio de 28 bytes** por pacote. Embora o impacto do tamanho seja menor que o impacto temporal, ele contribui para o *throughput* reduzido.

Em conclusão, a análise demonstra que o **TLS é 2.22x mais lento** (Fator de Desaceleração) que o TCP Puro. No entanto, este custo é amplamente compensado pela garantia de **confidencialidade, integridade e autenticidade** que o TLS oferece, sendo um requisito indispensável para a transmissão segura de informações em qualquer ambiente de rede profissional.

Conclusão

Este trabalho demonstrou a diferença crítica entre o transporte de dados em texto plano (TCP) e o transporte seguro (TLS). Apesar do *overhead* de desempenho, o custo é justificado pela garantia de confidencialidade, integridade e autenticidade, essenciais para a segurança moderna em redes de computadores.