

# Sistema Criptográfico RSA - Teoria e Aplicação

Iago Nicolas Lopes Lima

3 de junho de 2024

## Resumo

Este relatório apresenta uma análise detalhada do sistema criptográfico RSA, abordando sua teoria fundamental e aplicação prática. Desenvolvido em 1977 por Ronald Rivest, Adi Shamir e Leonard Adleman, o RSA se destaca como um dos métodos mais seguros e amplamente utilizados na criptografia assimétrica. O trabalho explora os fundamentos teóricos do RSA, suas aplicações práticas, e oferece uma implementação em Python. Os principais resultados mostram que, embora o RSA seja eficaz na proteção de dados, ele enfrenta desafios relacionados ao desempenho e à gestão de chaves. A análise detalha esses desafios e propõe possíveis melhorias, consolidando o RSA como uma ferramenta essencial na segurança da informação.

## Introdução/Motivação

A criptografia desempenha um papel vital na proteção das informações na era digital. Com a crescente quantidade de dados sendo transmitidos e armazenados eletronicamente, a segurança dessas informações tornou-se uma prioridade absoluta. O algoritmo RSA, desenvolvido por Ronald Rivest, Adi Shamir e Leonard Adleman em 1977, é um dos marcos mais importantes na evolução da criptografia. Este projeto tem como objetivo explorar profundamente a teoria por trás do RSA e avaliar sua aplicação prática em contextos modernos de segurança da informação.

## Objetivos

Os objetivos principais deste projeto incluem:

- Explorar e entender a teoria fundamental do sistema criptográfico RSA.
- Implementar o algoritmo RSA em um ambiente de programação controlado.
- Avaliar a eficácia do RSA na criptografia e descryptografia de dados.
- Identificar desafios e limitações na aplicação prática do RSA, sugerindo possíveis melhorias.

## Requisitos

Para a execução deste projeto, são necessários alguns pré-requisitos:

- Conhecimento básico de teoria dos números e álgebra, especialmente conceitos relacionados a números primos e fatoração.
- Ferramentas de programação, como C, C++ ou Python.
- Dados de teste para verificar a eficácia da criptografia e descryptografia.

## Roteiro

O projeto segue um roteiro estruturado nas seguintes etapas:

1. Revisão de literatura sobre criptografia assimétrica e o algoritmo RSA.
2. Estudo aprofundado da teoria matemática por trás do RSA, incluindo números primos, fatoração e aritmética modular.
3. Implementação prática do RSA utilizando C.
4. Realização de testes de criptografia e descriptografia com diferentes tipos e tamanhos de dados.
5. Análise dos resultados obtidos, identificando desafios e propondo melhorias.
6. Conclusões e recomendações finais sobre a aplicação do RSA.

A motivação para este projeto é clara: em um mundo cada vez mais digital, a segurança da informação é crucial. O RSA, como um dos algoritmos mais confiáveis e robustos, oferece uma excelente oportunidade para explorar e entender os mecanismos subjacentes à criptografia assimétrica. Além disso, este estudo contribui para o desenvolvimento contínuo de práticas seguras de comunicação e armazenamento de dados.

## Fundamentação Teórica

O RSA é um algoritmo de criptografia assimétrica que utiliza duas chaves distintas: uma chave pública para criptografar dados e uma chave privada para descriptografá-los. A segurança do RSA baseia-se na dificuldade de fatorar grandes números primos, um problema matemático que ainda não possui uma solução eficiente para números extremamente grandes.

### Teoria dos Números

A teoria dos números é uma área fundamental da matemática que estuda as propriedades dos números inteiros. Dois conceitos essenciais para o RSA são os números primos e a fatoração de inteiros.

#### Números Primos

Números primos são números naturais maiores que 1 que não podem ser formados pela multiplicação de dois números naturais menores. Exemplos incluem 2, 3, 5, 7, 11, 13, e assim por diante. A importância dos números primos na criptografia RSA reside no fato de que a multiplicação de dois números primos grandes é fácil, mas a fatoração do produto resultante é extremamente difícil.

#### Fatoração de Inteiros

Fatorar um número inteiro significa expressá-lo como um produto de números primos. Por exemplo, 15 pode ser fatorado em 3 e 5. A dificuldade de fatorar números grandes é a base da segurança do RSA. Se um adversário consegue fatorar o produto de dois números primos grandes usados na chave RSA, ele pode comprometer a segurança do sistema.

## Aritmética Modular

A aritmética modular é um sistema de aritmética para inteiros, onde os números "reiniciam" após atingir um certo valor, denominado módulo. A operação mais comum na aritmética modular é o cálculo do resto de uma divisão inteira, conhecida como operação de módulo. Por exemplo,  $17 \bmod 5 = 2$ , porque 17 dividido por 5 é 3 com um resto de 2.

## O Algoritmo RSA

O algoritmo RSA envolve três etapas principais: geração de chaves, criptografia e descriptografia.

### Geração de Chaves

A geração de chaves no RSA envolve os seguintes passos:

1. Escolha de dois números primos grandes,  $p$  e  $q$ .
2. Cálculo de  $n = p \times q$ , onde  $n$  é utilizado como o módulo tanto para a chave pública quanto para a chave privada.
3. Cálculo do totiente de  $n$ ,  $\phi(n) = (p - 1)(q - 1)$ .
4. Escolha de um número inteiro  $e$  tal que  $1 < e < \phi(n)$  e  $e$  seja coprimo a  $\phi(n)$ . O valor  $e$  torna-se o expoente da chave pública.
5. Cálculo do expoente da chave privada  $d$ , que é o inverso multiplicativo de  $e$  módulo  $\phi(n)$ , ou seja,  $d \times e \equiv 1 \pmod{\phi(n)}$ .

### Justificação dos Teoremas Utilizados

A segurança e funcionamento do RSA dependem de vários teoremas fundamentais da teoria dos números. Abaixo, apresentamos os teoremas utilizados e suas justificações.

**Teorema da Aritmética Modular** O Teorema da Aritmética Modular, que é a base para o cálculo de  $e$  e  $d$ , afirma que para qualquer número inteiro  $a$  e qualquer módulo  $m$ , existe um número inteiro  $k$  tal que:

$$a^k \equiv 1 \pmod{m}$$

A aritmética modular é usada para garantir que as operações de criptografia e descriptografia permaneçam dentro de um intervalo manejável de valores inteiros.

**Pequeno Teorema de Fermat** O Pequeno Teorema de Fermat afirma que se  $p$  é um número primo e  $a$  é um número inteiro tal que  $p$  não divide  $a$ , então:

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$$

Este teorema é utilizado para provar que a exponenciação modular usada no RSA é correta. Ele garante que:

$$a^{\phi(n)} \equiv 1 \pmod{n}$$

quando  $a$  é coprimo a  $n$ .

**Teorema de Euler** O Teorema de Euler generaliza o Pequeno Teorema de Fermat. Ele afirma que se  $n$  é um número inteiro positivo e  $a$  é um inteiro coprimo a  $n$ , então:

$$a^{\phi(n)} \equiv 1 \pmod{n}$$

onde  $\phi(n)$  é a função totiente de Euler, que conta o número de inteiros positivos menores que  $n$  que são coprimos a  $n$ . Este teorema é crucial para a definição da chave privada  $d$ , garantindo que a operação de descryptografia reverta corretamente a operação de criptografia.

**Algoritmo de Euclides Estendido** O Algoritmo de Euclides Estendido é utilizado para encontrar o inverso multiplicativo de  $e$  módulo  $\phi(n)$ . Este algoritmo é uma extensão do Algoritmo de Euclides, que encontra o máximo divisor comum (MDC) de dois inteiros. O Algoritmo de Euclides Estendido permite encontrar inteiros  $x$  e  $y$  tais que:

$$ax + by = \text{MDC}(a, b)$$

No caso do RSA, ele é usado para encontrar  $d$  tal que:

$$d \times e \equiv 1 \pmod{\phi(n)}$$

garantindo assim que  $d$  seja o inverso multiplicativo de  $e$  módulo  $\phi(n)$ .

## Criptografia e Descryptografia

### Criptografia

Para criptografar uma mensagem  $m$ :

1. Converte-se a mensagem  $m$  em um número  $M$  tal que  $0 \leq M < n$ .
2. Calcula-se o texto cifrado  $C$  utilizando a fórmula  $C = M^e \pmod{n}$ .

### Descryptografia

Para descryptografar o texto cifrado  $C$ :

1. Calcula-se a mensagem  $M$  utilizando a fórmula  $M = C^d \pmod{n}$ .
2. Converte-se o número  $M$  de volta para a mensagem original  $m$ .

## Segurança do RSA

A segurança do RSA depende da dificuldade de fatorar o produto de dois números primos grandes. Embora algoritmos eficientes de fatoração existam, eles não são práticos para números suficientemente grandes. Isso torna a criptografia RSA segura contra ataques de força bruta e fatoração direta.

## Algoritmos Relacionados

Além do RSA, existem outros algoritmos de criptografia assimétrica, como o ElGamal e o ECC (Elliptic Curve Cryptography). Cada um desses algoritmos possui suas próprias vantagens e desvantagens, dependendo da aplicação específica. Comparativamente, o RSA é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e robustez.

### Assinatura

SHA-256 (Secure Hash Algorithm 256-bit) é uma função de hash criptográfica que produz um hash de 256 bits (32 bytes) a partir de uma mensagem de entrada de qualquer tamanho. Ele é utilizado para garantir a integridade e a autenticidade das mensagens.

## Geração da assinatura

### 1. Hashing da Mensagem:

- A mensagem  $M$  é processada através do SHA-256 para produzir um hash  $H$ ;
- Este hash  $H$  é uma representação fixa e única da mensagem  $M$ :  $H = SHA - 256(M)$ .

### 2. Criptografia do Hash:

- O hash  $H$  é então criptografado usando a chave privada  $d$  do remetente. O resultado é a assinatura digital  $S$ :  $S = H^d \bmod n$ .

### 3. Verificação da Assinatura:

- O destinatário calcula o hash  $H'$  da mensagem recebida  $M$  utilizando SHA-256:  $H' = SHA - 256(M)$ ;
- A assinatura  $S$  é descriptografada usando a chave pública  $e$  do remetente para obter o hash  $H$ :  $H = S^e \bmod n$ ;
- O destinatário compara o hash calculado  $H'$  com o hash descriptografado  $H$ . Se  $H' = H$ , a assinatura é válida.

## Vulnerabilidades do RSA

Vamos considerar um sistema RSA onde o usuário A tem uma chave pública composta por  $n$  e  $e$ . Suponhamos os seguintes valores:

- $p = 61$
- $q = 53$
- Portanto,  $n = p \times q = 61 \times 53 = 3233$
- O expoente público  $e = 17$

Considere também uma mensagem  $m = 65$ .

### Como a chave de A é quebrada

Primeiro, verificamos se  $\text{MDC}(m, n) \neq 1$ . Vamos usar a função de Máximo Divisor Comum (MDC).

### Cálculo do MDC

Para  $m = 65$  e  $n = 3233$ :

$$\text{MDC}(65, 3233)$$

Usando o algoritmo de Euclides:

$$3233 = 65 \times 49 + 48$$

$$65 = 48 \times 1 + 17$$

$$48 = 17 \times 2 + 14$$

$$17 = 14 \times 1 + 3$$

$$14 = 3 \times 4 + 2$$

$$3 = 2 \times 1 + 1$$

$$2 = 1 \times 2 + 0$$

Portanto,  $\text{MDC}(65, 3233) = 1$ .

Para fins de exemplo, suponhamos  $m = 3230$ :

$$3233 = 3230 \times 1 + 3$$

$$3230 = 3 \times 1076 + 2$$

$$3 = 2 \times 1 + 1$$

$$2 = 1 \times 2 + 0$$

Então,  $\text{MDC}(3230, 3233) = 3$ .

### Fatoração usando o MDC

Encontramos um fator de  $n$ , que é 3. Agora podemos encontrar o outro fator:

$$\frac{n}{3} = \frac{3233}{3} = 1077.67$$

Isso indica que 3 e 1077.67 são os fatores de  $n$ . Podemos usar a mesma lógica para números mais apropriados onde  $\text{MDC}(m, n) \neq 1$  resulta em fatores corretos.

### Como falsificar a assinatura de A

Após encontrar  $p$  e  $q$ , podemos calcular a chave privada  $d$ .

#### Calcular $\phi(n)$

$$\phi(n) = (p - 1)(q - 1) = (61 - 1)(53 - 1) = 60 \times 52 = 3120$$

#### Encontrar $d$

Calcular  $d$  tal que  $d \times e \equiv 1 \pmod{\phi(n)}$ :

$$e = 17$$

$$\phi(n) = 3120$$

Usando o algoritmo estendido de Euclides:

$$3120 = 17 \times 183 + 9$$

$$17 = 9 \times 1 + 8$$

$$9 = 8 \times 1 + 1$$

$$8 = 1 \times 8 + 0$$

Portanto,  $d \equiv 2753 \pmod{3120}$ .

### Falsificação de Assinatura

Suponhamos que a mensagem  $m' = 89$ .

1. Calcular o hash  $H$  de  $m'$  usando SHA-256 (simplificado como  $H = 89$  para este exemplo).
2. Criar a assinatura falsa  $S$ :

$$S = H^d \pmod{n}$$

$$S = 89^{2753} \pmod{3233}$$

## O sistema de decifragem funciona normalmente

Mesmo se  $\text{MDC}(m, n) \neq 1$ , o processo de decifragem funciona normalmente.

## Criptografia

Para um texto cifrado  $C$ :

$$\begin{aligned}C &= m^e \mod n \\C &= 65^{17} \mod 3233 \\C &= 2790\end{aligned}$$

## Decifragem

Para decifrar:

$$\begin{aligned}m' &= C^d \mod n \\m' &= 2790^{2753} \mod 3233 \\m' &= 65\end{aligned}$$

Portanto, a decifragem reverte corretamente para  $m$ , provando que o sistema funciona mesmo com  $\text{MDC}(m, n) \neq 1$ .

## Calcule a probabilidade de ocorrência dessa situação

### Probabilidade de Coprimos

A probabilidade de dois números  $m$  e  $n$  serem coprimos é  $1/\zeta(2)$ , onde  $\zeta$  é a função zeta de Riemann.

$$\zeta(2) = \frac{\pi^2}{6} \approx 1.64493$$

Portanto, a probabilidade de  $\text{MDC}(m, n) = 1$  é  $1/\zeta(2) \approx 0.60793$ .

### Probabilidade de Não Serem Coprimos

A probabilidade de  $\text{MDC}(m, n) \neq 1$ :

$$P(\text{MDC}(m, n) \neq 1) = 1 - 0.60793 \approx 0.39207$$

## AES (Advanced Encryption Standard)

O AES (Advanced Encryption Standard) é um algoritmo de criptografia simétrica que utiliza a mesma chave para criptografar e descriptografar dados. Foi adotado como um padrão de criptografia pelo governo dos Estados Unidos e é amplamente utilizado devido à sua segurança e eficiência.

## Fundamentação Teórica do AES

O AES opera em blocos de 128 bits e utiliza chaves de 128, 192 ou 256 bits. A segurança do AES é baseada em conceitos da teoria dos números e da álgebra abstrata, como operações em campos finitos.

## Estrutura do AES

O AES realiza uma série de operações em cada bloco de dados:

- **SubBytes:** Substituição de cada byte no bloco usando uma tabela de substituição (S-box). A S-box é gerada a partir do inverso multiplicativo em um campo finito ( $\text{GF}(2^8)$ ) combinado com uma transformação afim. Esta operação introduz não-linearidade, fundamental para a segurança do AES.

$$S(x) = A \cdot x^{-1} \oplus B$$

onde  $S(x)$  é o valor da S-box,  $x^{-1}$  é o inverso multiplicativo de  $x$  em  $\text{GF}(2^8)$ ,  $A$  é uma matriz fixa, e  $B$  é um vetor constante.

- **ShiftRows:** Deslocamento circular das linhas da matriz de estado. Esta operação fornece difusão, distribuindo a influência de cada byte sobre o bloco de dados.

$$\text{ShiftRows}(s) = \begin{bmatrix} s_{0,0} & s_{0,1} & s_{0,2} & s_{0,3} \\ s_{1,1} & s_{1,2} & s_{1,3} & s_{1,0} \\ s_{2,2} & s_{2,3} & s_{2,0} & s_{2,1} \\ s_{3,3} & s_{3,0} & s_{3,1} & s_{3,2} \end{bmatrix}$$

- **MixColumns:** Mistura das colunas da matriz de estado utilizando multiplicações em um campo finito. Esta operação transforma cada coluna da matriz de estado para garantir que a saída de cada rodada dependa de todos os bytes da entrada. A multiplicação em campos finitos, especificamente  $\text{GF}(2^8)$ , garante que esta operação seja invertível, o que é crucial para a descryptografia.

$$\text{MixColumns}(a) = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$$

onde a multiplicação e adição são realizadas em  $\text{GF}(2^8)$ .

- **AddRoundKey:** Adição da chave de rodada à matriz de estado utilizando uma operação XOR. Esta operação combina os dados da mensagem com a chave de criptografia, introduzindo segurança dependente da chave.

$$\text{AddRoundKey}(s, k) = s \oplus k$$

onde  $s$  é a matriz de estado e  $k$  é a subchave de rodada.

Cada rodada, exceto a última, consiste em todas as quatro operações. A última rodada omite a operação MixColumns.

## Vantagens do AES

- **Eficiência:** AES é altamente eficiente em termos de desempenho, especialmente em hardware, devido à sua capacidade de ser implementado de forma otimizada em diversos dispositivos.
- **Segurança:** AES oferece um alto nível de segurança, sendo resistente a vários tipos de ataques criptográficos conhecidos, como ataques de força bruta e criptoanálise diferencial.
- **Flexibilidade:** AES pode ser usado com diferentes tamanhos de chave (128, 192 e 256 bits), proporcionando um equilíbrio entre segurança e desempenho.



## Operações em Campos Finitos ( $GF(2^8)$ )

A teoria dos números e a álgebra abstrata fornecem a base para muitas operações no AES, especialmente as realizadas no campo finito  $GF(2^8)$ . Um campo finito é um conjunto de números onde todas as operações (adição, subtração, multiplicação e divisão) são realizadas de acordo com as regras da aritmética modular.

No contexto do AES, cada byte (8 bits) é tratado como um elemento do campo finito  $GF(2^8)$ . As operações de substituição e mistura no AES garantem que o algoritmo possui uma alta avalanche, onde uma pequena mudança na entrada resulta em uma grande mudança na saída, uma propriedade crucial para a segurança de um algoritmo criptográfico.

## Segurança do AES

A segurança do AES baseia-se na complexidade das operações em campos finitos e na dificuldade de resolver sistemas de equações algébricas envolvendo essas operações. A transformação não-linear (SubBytes) e a difusão (ShiftRows e MixColumns) asseguram que o AES resista a criptoanálises lineares e diferenciais, fornecendo um algoritmo robusto e seguro para criptografia de dados.

## Metodologia

A metodologia para este projeto envolveu a implementação do algoritmo RSA, seguida por uma série de testes para verificar sua eficácia e desempenho. Abaixo estão as etapas detalhadas do projeto.

## Verificação de Requisitos

Os requisitos do sistema foram verificados através de uma série de testes que incluíam:

1. **Teste de Correção:** Verificação se uma mensagem criptografada e, em seguida, descriptografada retorna à sua forma original.
2. **Teste de Desempenho:** Medição do tempo de execução para criptografia e descriptografia de mensagens de diferentes tamanhos.
3. **Teste de Segurança:** Avaliação da resistência do sistema contra tentativas de fatoração e ataques de força bruta.

## Resultados Esperados

Esperava-se que tanto o sistema RSA quando o sistema RSA + AES fossem capazes de criptografar e descriptografar mensagens de forma segura e eficiente, com tempos de execução razoáveis para mensagens de tamanho pequeno no caso do RSA e grande no caso do RSA + AES. Além disso, o sistema deveria demonstrar robustez contra tentativas de ataques.

## Ambiente de Desenvolvimento

O ambiente de desenvolvimento para a implementação do RSA foi configurado em uma máquina local com as seguintes especificações:

- Sistema Operacional: Fedora 40
- Processador: Intel Core i7-10710u

- Memória RAM: 64GB
- IDE: CLion 2024.1.2
- Padrão C: C99

## Procedimento de Teste

O procedimento de teste envolveu a criptografia e descryptografia de mensagens de diferentes tamanhos para avaliar a correção e o desempenho do algoritmo. As mensagens testadas variaram de pequenas frases a longos textos, incluindo dados binários.

## Segurança e Gestão de Chaves

A segurança e gestão de chaves são aspectos críticos na implementação do RSA. Foram adotadas práticas recomendadas para a geração segura de números primos e o armazenamento seguro das chaves privadas. A geração de números primos foi realizada utilizando a biblioteca Openssl, que oferece funções robustas para gerar números primos grandes com segurança. As chaves privadas e os componentes que a geram foram armazenadas em um formato não criptografado devido ao contexto de teste que temos.

## Implementação do RSA

A implementação do RSA foi realizada utilizando a linguagem de programação C, devido à sua simplicidade e vasta biblioteca de funções matemáticas.

## Ferramentas Utilizadas

- Linguagem de programação C
- Bibliotecas: Openssl

## Passos da Implementação

1. Geração de um par de chaves RSA;
2. Salvamento das chaves em arquivos;
3. Salvamento dos componentes das chaves em arquivos;
4. Criptografia e descryptografia de dados;
5. Assinatura e verificação de mensagens.

## Estrutura do Programa

O programa é estruturado em várias funções para modularizar a funcionalidade, facilitando a manutenção e a clareza do código.

## Definição de bibliotecas e Tratamento de Erros

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <openssl/rsa.h>
#include <openssl/pem.h>
#include <openssl/err.h>

#define RSA_KEY_BITS 1024

void handleErrors(void) {
    ERR_print_errors_fp(stderr);
    abort();
}
```

- `#include <openssl/rsa.h>`, `#include <openssl/pem.h>` e `#include <openssl/err.h>`: Inclusão das bibliotecas necessárias do OpenSSL para RSA, PEM (formato de arquivo de chave) e tratamento de erros;
- `RSA_KEY_BITS 1024`: Define o tamanho da chave RSA em bits;
- `handleErrors(void)`: Função para lidar com erros do OpenSSL, imprimindo-os e abortando a execução do programa.

## Geração do Par de Chaves RSA

```
void generate_keypair(RSA **rsa_keypair) {
    BIGNUM *e = BN_new();
    RSA *rsa = RSA_new();

    if (!e || !rsa) { handleErrors(); }

    BN_set_word(e, RSA_F4);

    if (!RSA_generate_key_ex(rsa, RSA_KEY_BITS, e, NULL)) {
        handleErrors();
    }

    *rsa_keypair = rsa;

    BN_free(e);
}
```

A função `generate_keypair` é responsável por gerar o par de chaves RSA. Vamos detalhar os passos e os cálculos envolvidos:

### 1. Inicialização das Estruturas:

- `BIGNUM *e = BN_new()` e `RSA *rsa = RSA_new()`: Cria novas estruturas `BIGNUM` e `RSA`;
- Estas estruturas são essenciais para armazenar os componentes das chaves RSA.

## 2. Definição do Expoente Público:

- `BN_set_word(e, RSA_F4)`: Define o expoente público como 65537 (`RSA_F4`);
- O valor 65537 é escolhido porque é um número primo que facilita operações eficientes e seguras na criptografia.

## 3. Geração das Chaves:

- `RSA_generate_key_ex(rsa, RSA_KEY_BITS, e, NULL)`: Gera o par de chaves RSA com o tamanho definido;
- Este processo envolve a escolha de dois números primos grandes  $p$  e  $q$ , e o cálculo dos seguintes componentes:
  - **Módulo**  $n = p * q$ : Produto dos dois primos;
  - **Totiente**  $\phi(n) = (p - 1) * (q - 1)$ ;
  - **Chave pública**  $(e, n)$ : Em que  $e$  é o expoente público e  $n$  é o módulo;
  - **Chave privada**  $(d, n)$ : Onde  $d$  é o inverso multiplicativo de  $e$  módulo  $\phi(n)$ , calculado para satisfazer  $d * e \equiv 1 \pmod{\phi(n)}$ .

## Salvamento das Chaves em Arquivos

```
void save_keys(RSA *rsa_keypair) {
    FILE *pub_file = fopen("public_key.txt", "wb");
    if (!pub_file) { handleErrors(); }
    PEM_write_RSA_PUBKEY(pub_file, rsa_keypair);
    fclose(pub_file);

    FILE *priv_file = fopen("private_key.txt", "wb");
    if (!priv_file) { handleErrors(); }
    PEM_write_RSAPrivateKey(
        priv_file, rsa_keypair, NULL, NULL, 0, NULL, NULL
    );
    fclose(priv_file);
}
```

A função `save_keys` salva as chaves pública e privada em arquivos no formato PEM, que é um formato de arquivo que facilita a leitura e escrita de chaves.

## Salvamento dos Componentes das Chaves

```
void write_bn_to_file(
    FILE *file, const char *label, const BIGNUM *bn
) {
    char *dec = BN_bn2dec(bn);
    if (!dec) { handleErrors(); }
    fprintf(file, "%s: %s\n", label, dec);
    OPENSSL_free(dec);
}

void save_key_components(RSA *rsa_keypair) {
    FILE *pub_file = fopen(
```

```

        "public_key_components_hex.txt", "w"
    );
    if (!pub_file) { handleErrors(); }

    const BIGNUM *n = RSA_get0_n(rsa_keypair);
    const BIGNUM *e = RSA_get0_e(rsa_keypair);

    write_bn_to_file(pub_file, "Modulus (n)", n);
    write_bn_to_file(pub_file, "Public Exponent (e)", e);

    fclose(pub_file);

    FILE *priv_file = fopen(
        "private_key_components_hex.txt", "w"
    );
    if (!priv_file) { handleErrors(); }

    const BIGNUM *d = RSA_get0_d(rsa_keypair);
    const BIGNUM *p = RSA_get0_p(rsa_keypair);
    const BIGNUM *q = RSA_get0_q(rsa_keypair);
    const BIGNUM *dmp1 = RSA_get0_dmp1(rsa_keypair);
    const BIGNUM *dmq1 = RSA_get0_dmq1(rsa_keypair);
    const BIGNUM *iqmp = RSA_get0_iqmp(rsa_keypair);

    write_bn_to_file(priv_file, "Modulus (n)", n);
    write_bn_to_file(priv_file, "Public Exponent (e)", e);
    write_bn_to_file(priv_file, "Private Exponent (d)", d);
    write_bn_to_file(priv_file, "Prime 1 (p)", p);
    write_bn_to_file(priv_file, "Prime 2 (q)", q);
    write_bn_to_file(priv_file, "Exponent 1 (dmp1)", dmp1);
    write_bn_to_file(priv_file, "Exponent 2 (dmq1)", dmq1);
    write_bn_to_file(priv_file, "Coefficient (iqmp)", iqmp);

    fclose(priv_file);
}

```

Esta função salva os componentes das chaves em arquivos separados, permitindo uma análise detalhada dos valores individuais.

## Criptografia e Descriptografia

```

int main() {
    RSA *rsa_keypair = NULL;
    generate_keypair(&rsa_keypair);
    save_keys(rsa_keypair);
    save_key_components(rsa_keypair);

    const char *plaintext = "hello world!";
    int plaintext_len = strlen(plaintext);

    unsigned char *ciphertext =

```

```

        (unsigned char *)malloc(RSA_size(rsa_keypair));
if (!ciphertext) { handleErrors(); }

int ciphertext_len =
    RSA_public_encrypt(
        plaintext_len,
        (unsigned char *) plaintext,
        ciphertext,
        rsa_keypair,
        RSA_PKCS1_PADDING
    );
if (ciphertext_len == -1) { handleErrors(); }

unsigned char *decrypted_text =
    (unsigned char *)malloc(RSA_size(rsa_keypair));
if (!decrypted_text) { handleErrors(); }

int decrypted_len =
    RSA_private_decrypt(
        ciphertext_len,
        ciphertext,
        decrypted_text,
        rsa_keypair,
        RSA_PKCS1_PADDING
    );
if (decrypted_len == -1) { handleErrors(); }

printf("Plaintext: %s\n", plaintext);
printf("Ciphertext: ");
for (int i = 0; i < ciphertext_len; i++) {
    printf("%02x", ciphertext[i]);
}
printf("\n");
printf("Decrypted text: %s\n", decrypted_text);

unsigned char *signature =
    (unsigned char *)malloc(RSA_size(rsa_keypair));
if (!signature) { handleErrors(); }

const char *message = "Hello Bob!";
int message_len = strlen(message);

unsigned int signature_len;
if (!RSA_sign(
    NID_sha256,
    (unsigned char *) message,
    message_len,
    signature,
    &signature_len,
    rsa_keypair

```

```

    )) {
        handleErrors();
    }

    int verified =
        RSA_verify(
            NID_sha256,
            (unsigned char *) message,
            message_len,
            signature,
            signature_len,
            rsa_keypair
        );

    (verified != 1) ? printf(
        "Signature verification failed!\n"
    ) : printf(
        "Signature verified. Message authenticated!\n"
    );

    RSA_free(rsa_keypair);
    free(ciphertext);
    free(decrypted_text);
    free(signature);

    return 0;
}

```

A função main realiza as operações de criptografia, descriptografia, assinatura e verificação. Vamos detalhar os cálculos envolvidos na criptografia e descriptografia:

### 1. Criptografia:

- **RSA\_public\_encrypt:** Função que aplica a operação de criptografia usando a chave pública;
- **Fórmula:**  $C = M^e \bmod n$ , onde  $M$  é a mensagem convertida em um número,  $e$  é o expoente público e  $n$  o módulo;
- Essa operação eleva o número  $M$  à potência  $e$  e em seguida aplica o módulo  $n$  resultando no texto cifrado  $C$ .

### 2. Descriptografia:

- **RSA\_private\_decrypt:** Função que aplica a operação de descriptografia usando a chave privada;
- **Fórmula:**  $M = C^d \bmod n$ , em que  $C$  é o texto cifrado e  $d$  é o expoente privado e  $n$  é o módulo;
- Esta operação eleva o texto cifrado  $C$  à potência  $d$  e em seguida aplica o módulo  $n$ , resultando na mensagem original  $M$ .

### 3. Assinatura e Verificação:

- **RSA\_sign:** Função que gera uma assinatura digital usando a chave privada;

- **RSA\_verify**: Função que verifica a assinatura digital usando a chave pública;
- As funções de assinatura e verificação utilizam o algoritmo de hash SHA-256 para garantir a integridade e autenticidade da mensagem.

## Assinatura Digital usando SHA-256 e RSA

A autenticação e a integridade da mensagem são garantidas combinando a função de hash SHA-256 com o algoritmo de criptografia RSA.

A função de hash SHA-256 (Secure Hash Algorithm 256-bit) é um dos algoritmos mais amplamente utilizados para garantir a integridade e a autenticidade de dados em segurança da informação. Abaixo, explicamos como a função de hash SHA-256 funciona em detalhes.

Uma função de hash criptográfica é um algoritmo que recebe uma entrada (ou mensagem) de qualquer tamanho e produz uma saída fixa (chamada de hash) de tamanho determinado. No caso do SHA-256, a saída é um valor hash de 256 bits (32 bytes).

Alguns motivos de nossa escolha é:

- **Determinística**: A mesma mensagem de entrada sempre produzirá o mesmo hash de saída;
- **Rápida de Computar**: É rápido calcular o hash para qualquer mensagem;
- **Resistente a Pré-Imagem**: Dado um hash  $H$ , é difícil encontrar uma mensagem  $M$  tal que  $\text{hash}(M) = H$ ;
- **Resistente a Segunda Pré-Imagem**: Dada uma mensagem  $M_1$ , é difícil encontrar uma mensagem diferente  $M_2$  que tenha  $\text{hash}(M_1) = \text{hash}(M_2)$ ;
- **Resistente a Colisão**: É difícil encontrar duas mensagens diferentes  $M_1$  e  $M_2$  que tenham o mesmo hash.

A função SHA-256 processa a mensagem de entrada em várias etapas para produzir o valor hash final. Aqui estão os passos principais:

### 1. Preprocessamento:

- **Padding**: A mensagem de entrada é preenchida (ou "padded") para que seu comprimento em bits seja congruente a 448 (mod 512). Isso significa que a mensagem será preenchida para que o comprimento seja 64 bits a menos que um múltiplo de 512;
  - Adiciona-se um bit '1' ao final da mensagem;
  - Adicionam-se bits '0' até que o comprimento seja 448 (mod 512).
- **Comprimento**: O comprimento original da mensagem é anexado ao final da mensagem preenchida, representado como um inteiro de 64 bits.

### 2. Inicialização das Variáveis de Hash:

- O SHA-256 utiliza oito variáveis de hash inicializadas com valores constantes específicos. Estas variáveis são:

```

h0 = 0x6a09e667
h1 = 0xbb67ae85
h2 = 0x3c6ef372
h3 = 0xa54ff53a
h4 = 0x510e527f
h5 = 0x9b05688c
h6 = 0x1f83d9ab
h7 = 0x5be0cd19

```



### 3. Processamento em Blocos:

- A mensagem preenchida é dividida em blocos de 512 bits (64 bytes) para processamento;
- Cada bloco é então processado em uma série de 64 rodadas utilizando operações lógicas e aritméticas. As operações principais incluem:
  - **Funções Booleanas:** Ch, Maj,  $\sum 0$ ,  $\sum 1$ ,  $\sigma 0$ ,  $\sigma 1$ ;
  - **Constantes de Rodada:** SHA-256 usa uma série de constantes específicas para cada uma das 64 rodadas.

### 4. Transformação de Compressão:

- Para cada bloco de 512 bits:
  - Expande-se o bloco em uma sequência de 64 palavras de 32 bits;
  - Inicializa-se oito variáveis de trabalho com os valores atuais das variáveis de hash;
  - Realiza-se uma série de 64 rodadas de operações de mistura que incluem adições, rotações e operações lógicas. Cada rodada usa uma constante específica e uma parte do bloco expandido;
  - Atualiza-se as variáveis de hash com os valores das variáveis de trabalho.

### 5. Combinação dos Resultados:

- Após processar todos os blocos, os valores finais das variáveis de hash são concatenados para produzir o hash final de 256 bits.

\*Exemplo Simplificado Considere a mensagem "abc" para o exemplo simplificado a seguir:

#### 1. Conversão para Binário:

- "abc" em ASCII:
  - 'a' = 97 = 01100001;
  - 'b' = 98 = 01100010;
  - 'c' = 99 = 01100011;
  - "abc" = 01100001 01100010 01100011.

#### 2. Padding:

- Adicione '1':
  - "01100001 01100010 01100011 1";
- Inicialmente, a mensagem tem 24 bits. Precisamos adicionar 424 bits de padding 448 – 24 para totalizar 448 bits:
  - 01100001 01100010 01100011 1 00000000 00000000 ... (424 bits de '0')
- Representamos o comprimento da mensagem original (24 bits) como um número binário de 64 bits e adicionamos ao final:
  - 01100001 01100010 01100011 1 00000000 ... 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00011000

#### 3. Inicialização e Processamento: Agora que a mensagem tem exatamente 512 bits (64 bytes), o que é necessário para SHA-256, podemos realizar o processamento.

- Inicialize variáveis de hash (os oito valores citados acima);

- Divida a mensagem preenchida em blocos de 512 bits (já temos uma mensagem com esse tamanho);
- Realizam-se as 64 rodadas de operações de mistura para cada bloco, como o exemplo a seguir:

```

for i from 0 to 63:
    S1 :=
        (e rightrotate 6) ^
        (e rightrotate 11) ^
        (e rightrotate 25)
    ch := (e and f) ^ ((not e) and g)
    temp1 := h + S1 + ch + k[i] + w[i]
    S0 :=
        (a rightrotate 2) ^
        (a rightrotate 13) ^
        (a rightrotate 22)
    maj := (a and b) ^ (a and c) ^ (b and c)
    temp2 := S0 + maj

h := g
g := f
f := e
e := d + temp1
d := c
c := b
b := a
a := temp1 + temp2

```

#### 4. Combinação dos Resultados:

- Após processar o bloco de 512 bits, atualizam se as variáveis de hash:

```

h0 := h0 + a
h1 := h1 + b
h2 := h2 + c
h3 := h3 + d
h4 := h4 + e
h5 := h5 + f
h6 := h6 + g
h7 := h7 + h

```

#### 5. Hash Final:

- Finalmente, os valores das variáveis de hash (h0, h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7) são concatenados para formar o hash final de 256 bits. Cada variável de hash é de 32 bits, totalizando 256 bits. O resultado é o hash SHA-256 da mensagem "abc".

## Criptografia Híbrida: Integração de AES com RSA

A criptografia híbrida combina os pontos fortes dos algoritmos de criptografia assimétrica (RSA) e simétrica (AES) para obter maior eficiência e segurança. A seguir, apresentamos a implementação dessa integração utilizando a linguagem C e as bibliotecas OpenSSL.

## Implementação da Criptografia Híbrida

A implementação do AES e RSA em conjunto permite a criptografia de mensagens maiores com menor perda de desempenho. A seguir, apresentamos a estrutura do código C que implementa essa abordagem complementando o código RSA anterior.

```
int aes_encrypt(
    const unsigned char *plaintext,
    int plaintext_len, unsigned char *ciphertext,
    unsigned char *iv,
    const unsigned char *key
) {
    EVP_CIPHER_CTX *ctx;
    int len;
    int ciphertext_len;

    if (!(ctx = EVP_CIPHER_CTX_new())) handleErrors();
    if (1 != EVP_EncryptInit_ex(
        ctx, EVP_aes_256_cbc(), NULL, key, iv)
        ) handleErrors();
    if (1 != EVP_EncryptUpdate(
        ctx, ciphertext, &len, plaintext, plaintext_len
        )) handleErrors();
    ciphertext_len = len;
    if (1 != EVP_EncryptFinal_ex(
        ctx, ciphertext + len, &len
        )) handleErrors();
    ciphertext_len += len;
    EVP_CIPHER_CTX_free(ctx);

    return ciphertext_len;
}

int aes_decrypt(
    const unsigned char *ciphertext,
    int ciphertext_len,
    unsigned char *plaintext,
    const unsigned char *iv,
    const unsigned char *key
) {
    EVP_CIPHER_CTX *ctx;
    int len;
    int plaintext_len;

    if (!(ctx = EVP_CIPHER_CTX_new())) handleErrors();
    if (1 != EVP_DecryptInit_ex(
        ctx, EVP_aes_256_cbc(), NULL, key, iv
        )) handleErrors();
    if (1 != EVP_DecryptUpdate(
        ctx, plaintext, &len, ciphertext, ciphertext_len
        )) handleErrors();
}
```

```

    plaintext_len = len;
    if (1 != EVP_DecryptFinal_ex(
        ctx, plaintext + len, &len
    )) handleErrors();
    plaintext_len += len;
    EVP_CIPHER_CTX_free(ctx);

    return plaintext_len;
}

```

Com a junção de ambos códigos, utilizamos o RSA para criptografar uma chave AES gerada aleatoriamente. A mensagem original é então criptografada usando a chave AES. Essa abordagem oferece várias vantagens, especialmente quanto à performance.

## Análise

A análise dos resultados focou na comparação entre os resultados obtidos e os esperados, destacando os desafios encontrados durante o processo.

## Correção dos Resultados

Os testes de correção mostraram que o sistema RSA implementado conseguiu criptografar e descriptografar mensagens corretamente, confirmando a precisão da implementação. As mensagens criptografadas foram recuperadas integralmente após a descriptografia, demonstrando que o algoritmo foi implementado corretamente.

## Desempenho

Os testes de desempenho revelaram que, embora o RSA seja eficiente para mensagens curtas, o tempo de execução aumenta significativamente para mensagens maiores conforme aumentamos o tamanho da chave. Isso se deve à complexidade da aritmética modular com números grandes. A criptografia e descriptografia de mensagens longas resultaram em tempos de execução elevados, o que pode ser um fator limitante em aplicações práticas que exigem processamento em tempo real. No entanto, ao utilizar AES (Advanced Encryption Standard), é possível criptografar mensagens maiores com menor perda de desempenho. O AES é otimizado para grandes volumes de dados e oferece uma combinação de segurança e eficiência, tornando-se uma escolha ideal para cenários que demandam alta performance e manuseio de grandes quantidades de informação.

## Segurança

Os testes de segurança indicaram que o sistema RSA é robusto contra ataques de fatoração, desde que os números primos escolhidos sejam suficientemente grandes. No entanto, foi identificado que a geração de chaves pode ser um ponto fraco se não for realizada com cuidado, pois a escolha inadequada de primos pode comprometer a segurança. A análise de ataques de força bruta mostrou que, com números primos grandes, o RSA oferece uma segurança sólida contra tais ataques.

## Desafios e Problemas

Durante a implementação, foram encontradas dificuldades relacionadas à eficiência da geração de números primos grandes e à execução de operações aritméticas com números extremamente grandes. Além disso, a gestão de chaves revelou-se um desafio, destacando a necessidade de um

armazenamento seguro e eficiente das chaves privadas. A geração de chaves RSA é um processo computacionalmente intensivo, e a escolha de números primos inadequados pode resultar em uma chave vulnerável.

Além desses desafios, o tamanho da mensagem também se mostrou um problema significativo. O RSA é eficiente para criptografar dados de tamanho pequeno, mas seu desempenho cai drasticamente à medida que o tamanho da mensagem aumenta. Isso ocorre devido à complexidade das operações aritméticas envolvidas, que são exponencialmente mais lentas para mensagens grandes. Para contornar essa limitação, a implementação de uma abordagem híbrida usando AES (Advanced Encryption Standard) foi essencial.

A criptografia RSA, embora altamente segura, não é adequada para mensagens grandes devido ao seu limite de tamanho de bloco, que é diretamente relacionado ao tamanho da chave. Por exemplo, com uma chave RSA de 1024 bits, o tamanho máximo de dados que podem ser criptografados diretamente é de aproximadamente 117 bytes, após descontar o espaço necessário para o padding. Isso torna a criptografia de mensagens maiores um desafio significativo.

Para resolver essa limitação, foi necessário adotar a criptografia híbrida, combinando RSA e AES. Com essa abordagem, a mensagem é criptografada usando AES, que é um algoritmo de criptografia simétrica eficiente para grandes volumes de dados e em seguida, a chave AES gerada aleatoriamente é criptografada usando RSA. Esse método proporciona grandes benefícios relacionados à performance.

Ao implementar a criptografia híbrida, conseguimos superar as limitações do RSA para mensagens grandes, aproveitando a eficiência do AES. Esta abordagem não só melhora o desempenho, mas também mantém um alto nível de segurança. A combinação de RSA e AES é ideal para aplicações que necessitam de criptografia robusta e eficiente para grandes volumes de dados.

## **Análise Comparativa**

Foi realizada uma análise comparativa entre o RSA e outros algoritmos de criptografia assimétrica, como o ElGamal e o ECC. A análise mostrou que o RSA oferece uma boa combinação de segurança e facilidade de implementação, mas enfrenta desafios de desempenho em comparação com algoritmos baseados em curvas elípticas (ECC), que podem oferecer uma segurança equivalente com chaves menores e operações mais rápidas.

## **Aplicações Práticas**

O RSA tem uma ampla gama de aplicações práticas, desde a segurança de comunicação em e-mails e navegadores da web até a assinatura digital de documentos e transações financeiras. No entanto, a aplicação do RSA em dispositivos com recursos limitados, como dispositivos móveis e IoT, pode ser desafiadora devido aos requisitos computacionais elevados.

## **Melhorias Propostas**

A principal melhoria seria a combinação do RSA com outros métodos de criptografia para oferecer um equilíbrio entre segurança e eficiência, no caso acima utilizamos o AES mas outros algoritmos poderiam ser avaliados e testados de forma a encontrar um *sweet spot*. A implementação de hardware específico para operações aritméticas pode também melhorar o desempenho em aplicações críticas, caso a implementação desse algoritmo fosse realizada em um sistema embarcado, a possibilidade de adicionar um circuito para auxiliar os cálculos realizados traria ganhos quando à performance e à eficiência do sistema.

## Conclusão

O sistema criptográfico RSA, embora complexo, é uma ferramenta poderosa para a criptografia de dados. A implementação prática do RSA mostrou-se eficaz na proteção de informações, confirmando a teoria subjacente. No entanto, desafios relacionados ao desempenho e à gestão de chaves foram identificados.

Para superar esses desafios, a integração do AES (Advanced Encryption Standard) como parte de uma abordagem híbrida se mostrou essencial. O AES permite a criptografia de grandes volumes de dados com alta eficiência, enquanto o RSA é utilizado para a criptografia segura da chave AES. Essa combinação aproveita as vantagens de ambos os algoritmos, resultando em uma solução criptográfica que é ao mesmo tempo segura e eficiente. A abordagem híbrida não apenas melhora o desempenho, mas também facilita a gestão de chaves, tornando-a mais adequada para aplicações práticas que exigem processamento rápido e seguro de grandes volumes de dados.

## Comentários sobre os Modelos Utilizados

O modelo teórico do RSA é sólido, baseado em princípios matemáticos bem estabelecidos. A implementação prática demonstrou a viabilidade do RSA para aplicações reais, embora a eficiência possa ser um problema para grandes volumes de dados. A escolha cuidadosa de números primos e a geração segura de chaves são cruciais para a eficácia do RSA.

A adição do AES (Advanced Encryption Standard) ao modelo de criptografia híbrida melhora significativamente a eficiência para grandes volumes de dados. O AES, sendo um algoritmo de criptografia simétrica, é muito mais rápido que o RSA para processar grandes quantidades de informações. Ao utilizar o RSA para criptografar apenas a chave AES e o AES para criptografar os dados, conseguimos um equilíbrio entre segurança e desempenho. Essa abordagem híbrida permite aproveitar a robustez do RSA para troca segura de chaves e a velocidade do AES para criptografia de dados volumosos, tornando a solução mais prática e eficaz para aplicações que exigem processamento rápido e seguro de grandes volumes de dados.

## Possíveis Aplicações

O RSA pode ser utilizado em diversas áreas, incluindo comunicação segura, assinatura digital e proteção de dados sensíveis. Sua capacidade de fornecer segurança robusta torna-o adequado para aplicações em setores financeiros, governamentais e de TI. No entanto, a aplicação do RSA em ambientes com restrições de recursos requer atenção especial aos requisitos computacionais.

## Indicação de Aperfeiçoamento

Para melhorar o desempenho do RSA, pode-se considerar o uso de otimizações como a Exponenciação Modular Rápida e algoritmos eficientes de geração de primos. Além disso, a combinação do RSA com outros métodos de criptografia pode oferecer um equilíbrio entre segurança e eficiência. A implementação de hardware específico para operações aritméticas pode também melhorar o desempenho em aplicações críticas. A adoção de práticas de gestão de chaves seguras é essencial para garantir a integridade e a confidencialidade dos dados.

# Referências

## Referências

- [1] Rivest, R. L., Shamir, A., & Adleman, L. (1978). A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems. *Communications of the ACM*, 21(2), 120-126.
- [2] Menezes, A. J., van Oorschot, P. C., & Vanstone, S. A. (1996). *Handbook of Applied Cryptography*. CRC Press.
- [3] Trappe, W., & Washington, L. C. (2006). *Introduction to Cryptography with Coding Theory*. Pearson.
- [4] Stallings, W. (2016). *Cryptography and Network Security: Principles and Practice*. Pearson.
- [5] Schneier, B. (1996). *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C*. John Wiley & Sons.
- [6] OpenSSL Project. (n.d.). OpenSSL Crypto Library. Retrieved from <https://www.openssl.org/docs/man3.0/man7/crypto.html>
- [7] Wikipedia. (n.d.). RSA (cryptosystem). Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/RSA\\_\(cryptosystem\)](https://en.wikipedia.org/wiki/RSA_(cryptosystem))
- [8] Wikipedia. (n.d.). Advanced Encryption Standard. Retrieved from [https://pt.wikipedia.org/wiki/Advanced\\_Encryption\\_Standard](https://pt.wikipedia.org/wiki/Advanced_Encryption_Standard)
- [9] Opensource.com. (2019). Cryptography basics with OpenSSL, part 1. Retrieved from <https://opensource.com/article/19/6/cryptography-basics-openssl-part-1>
- [10] Red Hat. (n.d.). Using OpenSSL. Retrieved from [https://access.redhat.com/documentation/pt-br/red\\_hat\\_enterprise\\_linux/7/html/security\\_guide/sec-using-openssl](https://access.redhat.com/documentation/pt-br/red_hat_enterprise_linux/7/html/security_guide/sec-using-openssl)
- [11] Linux Journal. (2004). An Introduction to OpenSSL Programming. Retrieved from <https://www.linuxjournal.com/article/6826>
- [12] Rajesh, B. N. (2019). Understanding RSA Public Key. Medium. Retrieved from <https://medium.com/@bn121rajesh/understanding-rsa-public-key-70d900b1033c>