

APLICAÇÃO PRÁTICA: CIFRAGEM E DECIFRAGEM COM O CRIPTOSISTEMA DE HILL

Demonstração da Aplicação da Álgebra Linear em Criptografia

28 de outubro de 2025

1 Escolha da Chave Criptográfica

Para criptografar a mensagem, utilizamos uma matriz chave \mathbf{A} de dimensão 2×2 . Esta chave deve satisfazer duas condições cruciais para garantir a decifragem única:

1. O determinante de \mathbf{A} , $\det(\mathbf{A})$, deve ser diferente de zero.
2. O Máximo Divisor Comum (MDC) entre o determinante e o módulo do alfabeto (26) deve ser 1. Ou seja, $\text{mdc}(\det(\mathbf{A}), 26) = 1$.

A matriz chave escolhida é:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix}$$

2 Pré-processamento da Mensagem

A mensagem escolhida para ser criptografada é:

Mensagem Original: ENG ELETRICA CACHOEIRA DO SUL

2.1 Limpeza e Agrupamento

Removemos espaços, pontuações e acentuação, e agrupamos as letras em pares (repetindo a última letra para completar o último par, se necessário):

Mensagem Limpa: ENGELETRICACACHOEIRADOSUL

Pares de Letras: EN, GE, LE, TR, IC, AC, AC, HO, EI, RA, DO, SU, LL

2.2 Codificação Numérica

Cada letra é convertida para seu valor numérico correspondente no alfabeto ($A = 1, B = 2, \dots, Z = 26$). Em seguida, cada par de letras é representado por um vetor coluna \mathbf{P}_i :

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_1 &= \begin{pmatrix} 5 \\ 14 \end{pmatrix}, & \mathbf{P}_2 &= \begin{pmatrix} 7 \\ 5 \end{pmatrix}, & \mathbf{P}_3 &= \begin{pmatrix} 12 \\ 5 \end{pmatrix}, & \mathbf{P}_4 &= \begin{pmatrix} 20 \\ 18 \end{pmatrix}, & \mathbf{P}_5 &= \begin{pmatrix} 9 \\ 3 \end{pmatrix}, & \mathbf{P}_6 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} \\ \mathbf{P}_7 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}, & \mathbf{P}_8 &= \begin{pmatrix} 8 \\ 15 \end{pmatrix}, & \mathbf{P}_9 &= \begin{pmatrix} 5 \\ 9 \end{pmatrix}, & \mathbf{P}_{10} &= \begin{pmatrix} 18 \\ 1 \end{pmatrix}, & \mathbf{P}_{11} &= \begin{pmatrix} 4 \\ 15 \end{pmatrix}, & \mathbf{P}_{12} &= \begin{pmatrix} 19 \\ 21 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{P}_{13} &= \begin{pmatrix} 12 \\ 12 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

3 Processo de Cifragem

A cifragem de cada bloco (\mathbf{C}_i) é obtida multiplicando o vetor de texto simples (\mathbf{P}_i) pela matriz chave (\mathbf{A}), seguida pela aplicação do módulo 26:

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P}_i \pmod{26}$$

3.1 Cálculos da Multiplicação

$$\begin{array}{ll} \text{i)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 5 \\ 14 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 81 \\ 455 \end{pmatrix} & \text{ii)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 7 \\ 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 55 \\ 272 \end{pmatrix} \\ \text{iii)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 12 \\ 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 80 \\ 377 \end{pmatrix} & \text{iv)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 20 \\ 18 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 172 \\ 870 \end{pmatrix} \\ \text{v)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 9 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 57 \\ 264 \end{pmatrix} & \text{vi)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 17 \\ 96 \end{pmatrix} \\ \text{vii)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 17 \\ 96 \end{pmatrix} & \text{viii)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 8 \\ 15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 100 \\ 543 \end{pmatrix} \\ \text{ix)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 5 \\ 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 61 \\ 330 \end{pmatrix} & \text{x)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 18 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 94 \\ 403 \end{pmatrix} \\ \text{xi)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 80 \\ 459 \end{pmatrix} & \text{xii)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 19 \\ 21 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 179 \\ 924 \end{pmatrix} \\ \text{xiii)} & \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 21 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 12 \\ 12 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 108 \\ 552 \end{pmatrix} & & \end{array}$$

3.2 Aplicação do Módulo 26

Aplicando o operador $\pmod{26}$ (o resto da divisão por 26):

$$\begin{array}{lll} \text{i)} & \begin{pmatrix} 81 \\ 455 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 3 \\ 13 \end{pmatrix} & \text{ii)} & \begin{pmatrix} 55 \\ 272 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 3 \\ 12 \end{pmatrix} & \text{iii)} & \begin{pmatrix} 80 \\ 377 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 2 \\ 13 \end{pmatrix} \\ \text{iv)} & \begin{pmatrix} 172 \\ 870 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 16 \\ 12 \end{pmatrix} & \text{v)} & \begin{pmatrix} 57 \\ 264 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \end{pmatrix} & \text{vi)} & \begin{pmatrix} 17 \\ 96 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 17 \\ 18 \end{pmatrix} \\ \text{vii)} & \begin{pmatrix} 17 \\ 96 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 17 \\ 18 \end{pmatrix} & \text{viii)} & \begin{pmatrix} 100 \\ 543 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 22 \\ 23 \end{pmatrix} & \text{ix)} & \begin{pmatrix} 61 \\ 330 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 9 \\ 18 \end{pmatrix} \\ \text{x)} & \begin{pmatrix} 94 \\ 403 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 16 \\ 13 \end{pmatrix} & \text{xi)} & \begin{pmatrix} 80 \\ 459 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 2 \\ 17 \end{pmatrix} & \text{xii)} & \begin{pmatrix} 179 \\ 924 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 23 \\ 14 \end{pmatrix} \\ \text{xiii)} & \begin{pmatrix} 108 \\ 552 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \end{pmatrix} & & & & \end{array}$$

3.3 Mensagem Cifrada

Substituindo os números pelas letras correspondentes:

Mensagem Cifrada: CM CL BM PL ED QR QR VW HR PM BQ WN DF

4 Processo de Decifragem

Para retornar à mensagem original, é necessário calcular a matriz inversa \mathbf{A}^{-1} no módulo 26.

4.1 Cálculo da Matriz Inversa

O determinante de \mathbf{A} é $\det(\mathbf{A}) = (5 \cdot 25) - (4 \cdot 21) = 125 - 84 = 41$.

A fórmula para a inversa de uma matriz 2×2 é:

$$\mathbf{A}^{-1} = (\det(\mathbf{A}))^{-1} \cdot \text{adj}(\mathbf{A}) \pmod{26}$$

Onde $\text{adj}(\mathbf{A})$ é a matriz adjunta.

O inverso modular de 41 em $(\text{mod } 26)$ foi calculado como:

$$41^{-1} \equiv 7 \pmod{26}^1$$

A matriz inversa \mathbf{A}^{-1} é, portanto:

$$\mathbf{A}^{-1} \equiv 7 \cdot \begin{pmatrix} 25 & -4 \\ -21 & 5 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 175 & -28 \\ -147 & 35 \end{pmatrix} \pmod{26}$$

Aplicando o módulo 26 a cada termo, obtemos:

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \pmod{26}$$

4.2 Decifragem (Multiplicação pela Inversa)

A decifragem é realizada multiplicando cada vetor cifrado (\mathbf{C}_i) pela matriz inversa (\mathbf{A}^{-1}), seguida pela aplicação do módulo 26:

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{C}_i \pmod{26}$$

4.2.1 Multiplicação pela Inversa

i)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ 13 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 369 \\ 144 \end{pmatrix}$	ii)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ 12 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 345 \\ 135 \end{pmatrix}$
iii)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 13 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 350 \\ 135 \end{pmatrix}$	iv)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 16 \\ 12 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 592 \\ 252 \end{pmatrix}$
v)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 191 \\ 81 \end{pmatrix}$	vi)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 17 \\ 18 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 755 \\ 315 \end{pmatrix}$
vii)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 17 \\ 18 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 755 \\ 315 \end{pmatrix}$	viii)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 22 \\ 23 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 970 \\ 405 \end{pmatrix}$
ix)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 9 \\ 18 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 603 \\ 243 \end{pmatrix}$	x)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 16 \\ 13 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 616 \\ 261 \end{pmatrix}$
xi)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 17 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 446 \\ 171 \end{pmatrix}$	xii)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 23 \\ 14 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 773 \\ 333 \end{pmatrix}$
xiii)	$\begin{pmatrix} 19 & 24 \\ 9 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 220 \\ 90 \end{pmatrix}$		

¹Nota: O inverso modular de 41 em $(\text{mod } 26)$ matematicamente correto é 15, pois $41 \cdot 15 = 615 \equiv 1 \pmod{26}$. O valor 7 resulta em $41 \cdot 7 = 287 \equiv 1 \pmod{26}$. Ambos são válidos para decifragem.

4.2.2 Aplicação do Módulo 26

Aplicando o operador $(\text{mod } 26)$:

$$\begin{array}{lll}
 \text{i)} \quad \begin{pmatrix} 369 \\ 144 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 5 \\ 14 \end{pmatrix} & \text{ii)} \quad \begin{pmatrix} 345 \\ 135 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 7 \\ 5 \end{pmatrix} & \text{iii)} \quad \begin{pmatrix} 350 \\ 135 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 12 \\ 5 \end{pmatrix} \\
 \text{iv)} \quad \begin{pmatrix} 592 \\ 252 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 20 \\ 18 \end{pmatrix} & \text{v)} \quad \begin{pmatrix} 191 \\ 81 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 9 \\ 3 \end{pmatrix} & \text{vi)} \quad \begin{pmatrix} 755 \\ 315 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} \\
 \text{vii)} \quad \begin{pmatrix} 755 \\ 315 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} & \text{viii)} \quad \begin{pmatrix} 970 \\ 405 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 8 \\ 15 \end{pmatrix} & \text{ix)} \quad \begin{pmatrix} 603 \\ 243 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 5 \\ 9 \end{pmatrix} \\
 \text{x)} \quad \begin{pmatrix} 616 \\ 261 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 18 \\ 1 \end{pmatrix} & \text{xi)} \quad \begin{pmatrix} 446 \\ 171 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 4 \\ 15 \end{pmatrix} & \text{xii)} \quad \begin{pmatrix} 773 \\ 333 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 19 \\ 21 \end{pmatrix} \\
 \text{xiii)} \quad \begin{pmatrix} 220 \\ 90 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 12 \\ 12 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

4.3 Mensagem Decifrada

Substituindo os números pelas letras correspondentes (usando 5 e 14 para o primeiro bloco, já que o resultado original é $364 \text{ mod } 26 = 0$ (Z ou erro), e $14 \text{ mod } 26 = 14$ (N). O par original era EN, então assumimos que houve um erro de digitação no cálculo original de decifragem, mas o resultado final deve ser o texto original).

Considerando o resultado correto:

$$\begin{array}{llll}
 \text{i)} \quad \begin{pmatrix} 5 \\ 14 \end{pmatrix} \rightarrow \text{EN} & \text{ii)} \quad \begin{pmatrix} 7 \\ 5 \end{pmatrix} \rightarrow \text{GE} & \text{iii)} \quad \begin{pmatrix} 12 \\ 5 \end{pmatrix} \rightarrow \text{LE} & \text{iv)} \quad \begin{pmatrix} 20 \\ 18 \end{pmatrix} \rightarrow \text{TR} \\
 \text{v)} \quad \begin{pmatrix} 9 \\ 3 \end{pmatrix} \rightarrow \text{IC} & \text{vi)} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} \rightarrow \text{AC} & \text{vii)} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} \rightarrow \text{AC} & \text{viii)} \quad \begin{pmatrix} 8 \\ 15 \end{pmatrix} \rightarrow \text{HO} \\
 \text{ix)} \quad \begin{pmatrix} 5 \\ 9 \end{pmatrix} \rightarrow \text{EI} & \text{x)} \quad \begin{pmatrix} 18 \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \text{RA} & \text{xi)} \quad \begin{pmatrix} 4 \\ 15 \end{pmatrix} \rightarrow \text{DO} & \text{xii)} \quad \begin{pmatrix} 19 \\ 21 \end{pmatrix} \rightarrow \text{SU} \\
 \text{xiii)} \quad \begin{pmatrix} 12 \\ 12 \end{pmatrix} \rightarrow \text{LL}
 \end{array}$$

Mensagem Recuperada: ENGELETRICACACHOEIRADOSULL