



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Programa de Engenharia Química - PEQ/COPPE

COQ 875 - Química Quântica de Moléculas e Sólidos | 2026.2

Lista 03 - Átomo de He e Molécula de H₂

Prof. Elvis Soares

Data de Entrega: 05/8/26

1. **Átomo de He:** Considere uma função de onda espacial tentativa para o estado fundamental do átomo de He escrita na forma

$$\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \psi(r_1)\psi(r_2)$$

onde $\psi(r)$ é a função de onda de 1 elétron. Podemos usar uma função de onda de 1 elétron num modelo de 1 parâmetro, com

$$\psi(r) = Ce^{-\lambda r}$$

sendo o orbital de Slater 1s normalizado, onde λ um parâmetro a ser determinado e C uma constante de normalização. Nessa questão usaremos unidades atômicas.

O hamiltoniano do átomo de He pode ser escrito como

$$\hat{H} = \hat{h}_1 + \hat{h}_2 + \hat{w}_{12}$$

com

$$\hat{h}_i = -\frac{1}{2}\nabla_i^2 - \frac{2}{r_i} \quad \text{e} \quad \hat{w}_{12} = \frac{1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}$$

- (a) Determine a constante de normalização C do orbital 1s de Slater.
- (b) Determine os seguintes valores esperados $\langle \hat{h}_1 \rangle$ e $\langle \hat{h}_2 \rangle$.
- (c) Determine o valor esperado da energia de interação entre os elétrons $\langle \hat{w}_{12} \rangle$.

Dica: Efetue primeiramente as integrais em θ_1 , φ_1 e φ_2 . Em seguida, escolha o ângulo

entre $\mathbf{r}_1$ e $\mathbf{r}_2$ como sendo o ângulo azimutal θ_2 , tal que

$$\langle \hat{w}_{12} \rangle = 8\pi^2 \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\pi \frac{|\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)|^2}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_2}} r_1^2 r_2^2 \sin \theta_2 d\theta_2 dr_2 dr_1,$$

e use que

$$\int_0^\pi \frac{\sin \theta_2 d\theta_2}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_2}} = \begin{cases} \frac{2}{r_1}, & r_1 > r_2, \\ \frac{2}{r_2}, & r_1 < r_2, \end{cases}$$

(d) Determine o valor do parâmetro λ para o qual o valor de $\langle \hat{H} \rangle$ seja mínimo. Qual é o valor da energia do estado fundamental nesse caso? Compare com o valor experimental que é de -78.975 eV.

2. **Molécula de H₂:** Considere a função de onda tentativa para o estado fundamental da molécula de H₂ escrita na forma

$$\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \psi(\mathbf{r}_1)\psi(\mathbf{r}_2)$$

onde $\psi(r)$ é a função de onda de 1 elétron escrita em LCAO na forma

$$\psi(\mathbf{r}) = c_A \phi_A(\mathbf{r}) + c_B \phi_B(\mathbf{r})$$

com o orbital de Slater 1s normalizado sendo escrito como

$$\phi_i(r) = C e^{-\lambda|\mathbf{r}-\mathbf{R}_i|}$$

onde o índice $i = A, B$ representa cada núcleo de hidrogênio, λ é um parâmetro variacional a ser determinado e C uma constante de normalização. Nessa questão novamente usaremos unidades atômicas. A normalização dos estados de Slater nos dá que

$$\langle \phi_A | \phi_A \rangle = \langle \phi_B | \phi_B \rangle = 1$$

e a função de overlap é dada por

$$S_{AB} = \langle \phi_A | \phi_B \rangle.$$

O Hamiltoniano da molécula de H₂ pode ser escrito como

$$\hat{H} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \nabla_i^2 - \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_A|} + \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_B|} \right) + \frac{1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}$$

tal que a energia do estado fundamental é dada por

$$E = \frac{\langle \psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) | \hat{H} | \psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \rangle}{\langle \psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) | \psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \rangle}$$

(a) Mostre que a energia pode ser calculada explicitamente como

$$E = \frac{2(c_A^2 H_{AA} + 2c_A c_B H_{AB} + c_B^2 H_{BB}) + c_A^2 G_{AA} + 2c_A c_B G_{AB} + c_B^2 G_{BB}}{c_A^2 + 2c_A c_B S_{AB} + c_B^2}$$

onde

$$H_{ij} = H_{ji} = \left\langle \phi_i(\mathbf{r}_1) \left| -\frac{1}{2} \nabla_1^2 - \frac{1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{R}_A|} - \frac{1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{R}_B|} \right| \phi_j(\mathbf{r}_1) \right\rangle$$

e

$$\begin{aligned} G_{ij} = G_{ji} = & \frac{1}{c_A^2 + 2c_A c_B S_{AB} + c_B^2} \left\{ c_A^2 \left\langle \phi_i(\mathbf{r}_1) \phi_A(\mathbf{r}_2) \left| \frac{1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \right| \phi_j(\mathbf{r}_1) \phi_A(\mathbf{r}_2) \right\rangle \right. \\ & + c_A c_B \left\langle \phi_i(\mathbf{r}_1) \phi_A(\mathbf{r}_2) \left| \frac{1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \right| \phi_j(\mathbf{r}_1) \phi_B(\mathbf{r}_2) \right\rangle \\ & + c_A c_B \left\langle \phi_i(\mathbf{r}_1) \phi_B(\mathbf{r}_2) \left| \frac{1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \right| \phi_j(\mathbf{r}_1) \phi_A(\mathbf{r}_2) \right\rangle \\ & \left. + c_B^2 \left\langle \phi_i(\mathbf{r}_1) \phi_B(\mathbf{r}_2) \left| \frac{1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \right| \phi_j(\mathbf{r}_1) \phi_B(\mathbf{r}_2) \right\rangle \right\} \end{aligned}$$

(b) Derive a equação para E com respeito a c_A e c_B mantendo G_{ij} fixos e mostre que as equações resultantes podem ser escritas na forma matricial como sendo

$$\begin{pmatrix} F_{AA} & F_{AB} \\ F_{AB} & F_{BB} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_A \\ c_B \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} 1 & S_{AB} \\ S_{AB} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_A \\ c_B \end{pmatrix}$$

com $F_{ij} = 2H_{ij} + G_{ij}$.

(Desafio) A partir do orbital de Slater, calcule os elementos de matriz de H_{ij} , G_{ij} e S_{AB} e escreva seus resultados em termos de λ e $R_{AB} = |\mathbf{R}_A - \mathbf{R}_B|$, onde R_{AB} é a distância entre os dois núcleos de hidrogênio. Sugestão: use ferramentas como *Mathematica* ou *Simpy* para facilitar os cálculos de algumas integrais.