

Curso práctico de Dinámica Molecular y Análisis de Trayectorias

Episodio 2: Ejecución de simulaciones

Jordi Villà i Freixa

Universitat de Vic - Universitat Central de Catalunya
Facultat de Ciències, Tecnologia i Enginyeries (FCTE)

jordi.villa@uvic.cat

Curso MD y Análisis de Trayectorias
Concepción, enero 2026

1 Episodio 2: Ejecución de simulaciones

- Parámetros clave (OpenMM User Guide §3.7)
- Discretización temporal
- Integradores clásicos
- Esquema leapfrog
- Conservación y NVE
- Termostatos
- Barostatos
- Restricciones
- Condiciones periódicas
- Minimum image
- Cutoffs y suavizado
- Electrostática de largo alcance
- Salida y reproducibilidad

Compromisos velocidad vs. exactitud

- Velocidad: pasos grandes y menos reporting.
- Exactitud numérica: integradores simpéticos, restricciones, timestep pequeño.
- OpenMM ofrece sliders para dt, constraints, hydrogenMass y termostatos (§3.7.6-3.7.8).

Paso y restricciones

$$\Delta t \approx \frac{1}{10\omega_{\max}}, \quad \omega_{\max} \sim \sqrt{\frac{k}{\mu}}.$$

- Con constraints=HBonds, se duplica el timestep.
- constraints=AllBonds/HAngles permiten más salto pero reducen flexibilidad.

Hidrógenos pesados

$$m_H^{\text{new}} = \alpha m_H, \quad m_{\text{heavy}}^{\text{new}} = m_{\text{heavy}} - (\alpha - 1)m_H.$$

- `hydrogenMass=1.5*amu` ralentiza oscilaciones sin perder masa total.
- Utilizado en scripts de integración, p.ej. el ejemplo `argon-chemical-potential.py` adapta este truco.

Acoplamientos térmicos y de presión

- LangevinIntegrator simula un baño de calor con fricción γ .
- Nosé-Hoover (cadena) controla distribución canónica manteniendo el momento.
- Barostato de Monte Carlo o Parrinello-Rahman aparece en los scripts de `simulateAmber.py`.

Reportes y checkpoints

- 'StateDataReporter' controla energía, temperatura, volumen y RMSD.
- 'DCDReporter' / 'NetCDFReporter' guardan trayectorias (OpenMM App §3.13-3.14).
- Usa 'CheckpointReporter' para reiniciar simulaciones largas (OpenMM §3.15).

Ecuaciones continuas y discretas

$$\dot{\mathbf{r}}(t) = \mathbf{v}(t), \quad \dot{\mathbf{v}}(t) = \frac{\mathbf{F}(t)}{m}.$$

- La simulación sustituye derivadas por incrementos finitos.

Paso de tiempo

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = \mathbf{r}(t) + \mathbf{v}(t)\Delta t + \mathcal{O}(\Delta t^2).$$

- Δt debe resolver las vibraciones más rápidas.

Error local y global

$$\text{error local} = \mathcal{O}(\Delta t^{p+1}),$$

$$\text{error global} = \mathcal{O}(\Delta t^p).$$

- Los integradores de orden p controlan la acumulación de error.

Escala de estabilidad

$$\Delta t \lesssim \frac{1}{10\omega_{\max}}.$$

- ω_{\max} proviene de los modos vibracionales más rápidos.

Criterio práctico

- Sin restricciones: $\Delta t \approx 1$ fs.
- Con SHAKE/RATTLE: $\Delta t \approx 2$ fs.

Euler explícito

$$\mathbf{v}_{t+\Delta t} = \mathbf{v}_t + \frac{\mathbf{F}_t}{m} \Delta t,$$
$$\mathbf{r}_{t+\Delta t} = \mathbf{r}_t + \mathbf{v}_t \Delta t.$$

- Simple pero inestable para dinámica molecular.

Verlet clásico

$$\mathbf{r}_{t+\Delta t} = 2\mathbf{r}_t - \mathbf{r}_{t-\Delta t} + \frac{\mathbf{F}_t}{m}\Delta t^2.$$

- Simétrico y reversible en el tiempo.

Velocity Verlet

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_{t+\Delta t} &= \mathbf{r}_t + \mathbf{v}_t \Delta t + \frac{\mathbf{F}_t}{2m} \Delta t^2, \\ \mathbf{v}_{t+\Delta t} &= \mathbf{v}_t + \frac{\mathbf{F}_t + \mathbf{F}_{t+\Delta t}}{2m} \Delta t.\end{aligned}$$

- Combina estabilidad y acceso directo a velocidades.

Simetría y estabilidad

- Integradores simpéticos conservan volumen en el espacio de fases.
- Evitan deriva energética en NVE.

Elección práctica

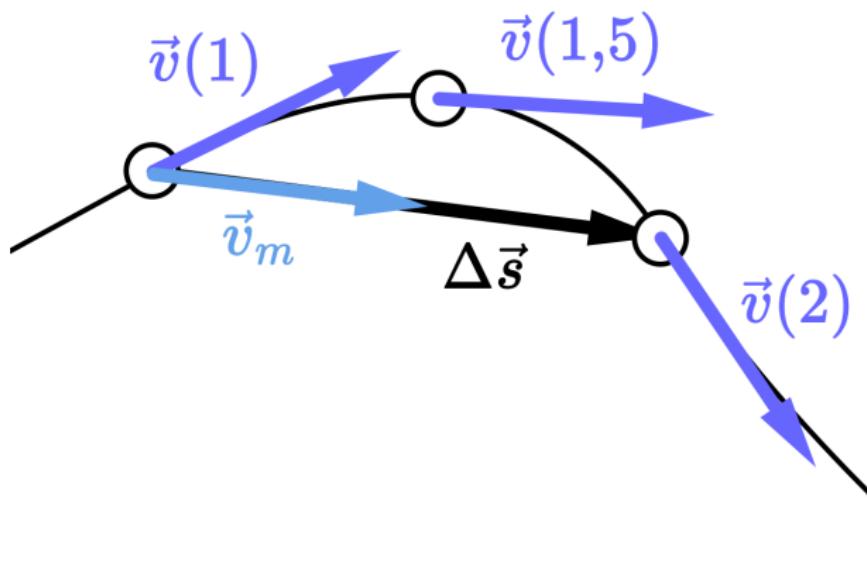
- OpenMM usa integradores tipo Verlet o Langevin.
- La elección depende del ensemble deseado.

Leapfrog

$$\mathbf{v}_{t+\Delta t/2} = \mathbf{v}_{t-\Delta t/2} + \frac{\mathbf{F}_t}{m} \Delta t,$$
$$\mathbf{r}_{t+\Delta t} = \mathbf{r}_t + \mathbf{v}_{t+\Delta t/2} \Delta t.$$

- Velocidades y posiciones “se alternan” en el tiempo.

Interpretación gráfica



Fuente: Wikimedia Commons (CC BY-SA 4.0). [2]

Ventajas

- Simétrico, reversible y de bajo coste.
- Conserva mejor la energía que Euler.

Relación con Verlet

- Leapfrog y velocity Verlet son algebraicamente equivalentes.
- Diferencias en el almacenamiento de velocidades.

Elección de integrador

- NVE: Verlet/Leapfrog.
- NVT: Langevin o Nosé-Hoover.

Energía total

$$E(t) = K(t) + U(t).$$

- En NVE ideal, $E(t)$ es constante.

Deriva energética

- Errores numéricos producen deriva secular.
- Se controla reduciendo Δt .

Temperatura instantánea

$$T = \frac{2\langle K \rangle}{3Nk_B}.$$

- En NVE, T fluctúa alrededor de un valor medio.

Comprobaciones rápidas

- Estabilidad de $E(t)$ y distribución de velocidades.
- Comparar $\langle K \rangle$ con el valor teórico.

Tiempo de equilibración

- Un pre-equilibrado estabiliza la energía antes de producir datos.

Objetivo del termostato

- Imponer una distribución canónica a temperatura T .
- Extraer o inyectar energía de forma controlada.

Dinámica de Langevin

$$m\ddot{\mathbf{r}} = -\nabla U - \gamma m\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{R}(t),$$
$$\langle \mathbf{R}(t)\mathbf{R}(t') \rangle = 2\gamma m k_{\text{B}} T \delta(t - t').$$

- Termostato estocástico con fricción y ruido.

- Reasigna velocidades aleatoriamente con frecuencia ν .
- Bueno para muestreo, menos realista dinámicamente.

Nosé-Hoover

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{F}_i - \xi \mathbf{p}_i, \quad \dot{\xi} = \frac{1}{Q} \left(\sum_i \frac{\mathbf{p}_i^2}{m_i} - 3Nk_{\text{B}}T \right).$$

- Termostato determinista con variable extendida.

Elección del termostato

- Langevin: robusto y estable.
- Nosé-Hoover: dinámica más realista si está bien parametrizado.

Presión microscópica

$$P = \frac{Nk_B T}{V} + \frac{1}{3V} \sum_{i < j} \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{F}_{ij}.$$

- La presión depende de energía cinética y fuerzas internas.

Barostato de Berendsen

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\tau_P} (P_0 - P)V.$$

- Rápido para equilibrar, no reproduce fluctuaciones exactas.

- Escala la celda de simulación con variables dinámicas.
- Permite cambios anisotrópicos del volumen.

- Ensemble realista para condiciones experimentales.
- Combina termostato y barostato.

Elección práctica

- Equilibración: Berendsen + Langevin.
- Producción: barostato más riguroso (Monte Carlo barostat).

Motivación

- Eliminar vibraciones rápidas permite aumentar Δt .

Restricciones holónomas

$$g_k(\mathbf{r}) = 0, \quad k = 1, \dots, M.$$

- Fijan distancias o àngulos internos.

SHAKE/RATTLE

- SHAKE corrige posiciones; RATTLE corrige posiciones y velocidades.

Impacto numérico

- Aumenta estabilidad y reduce coste de simulación.
- Puede alterar modos de alta frecuencia.

Recomendación

- Usar restricciones en enlaces con H para biomoléculas.

Motivación de PBC

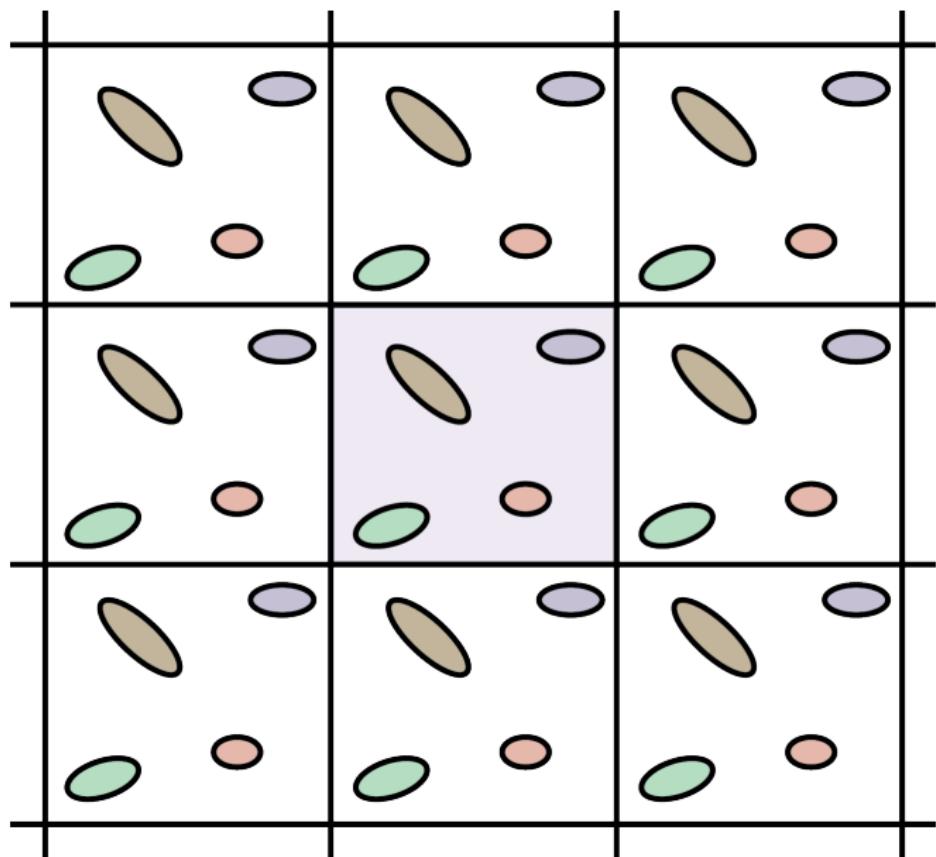
- Evita efectos de superficie en sistemas finitos.
- Emula un sistema infinito por replicación de la celda.

Celda periódica

$$\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r} + n_x \mathbf{a} + n_y \mathbf{b} + n_z \mathbf{c}.$$

- **a, b, c** definen la caja de simulación.

Ejemplo 2D



Implicaciones en dinámica

- Las partículas que salen reingresan por la cara opuesta.
- Se preserva la densidad en el volumen simulado.

Cajas no ortogonales

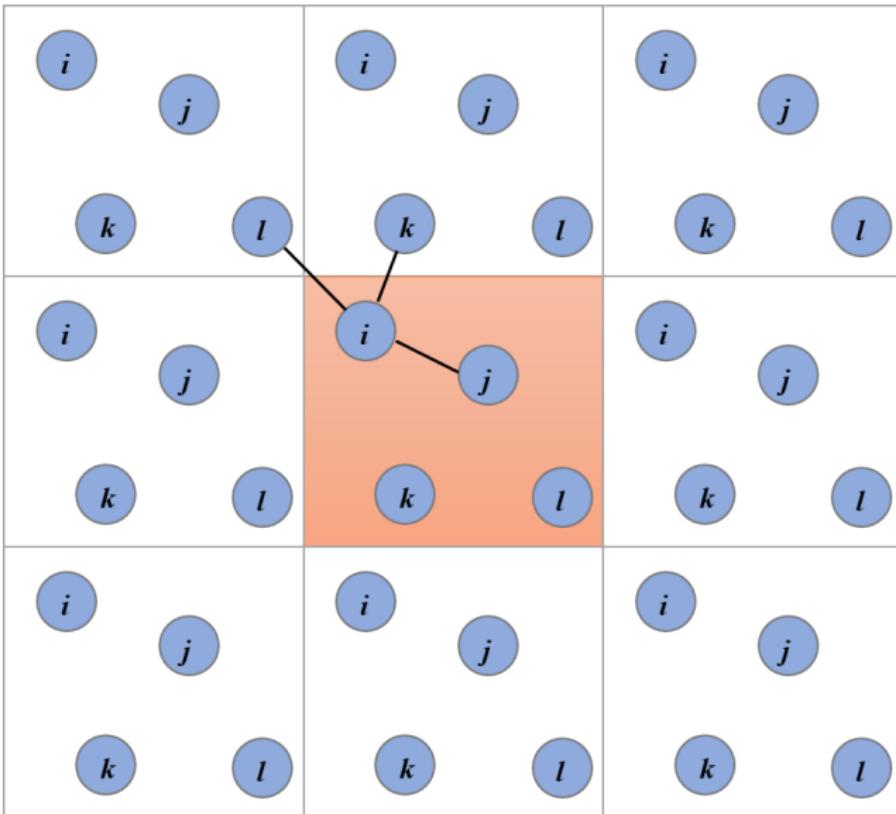
- Celdas triclínicas para cristales o membranas inclinadas.

Convención de imagen mínima

$$r_{ij} = \min_{\mathbf{n}} \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j + \mathbf{n}\|.$$

- Uso la imagen periódica más cercana para calcular interacciones.

Ejemplo visual



Fuente: Wikimedia Commons (CC BY-SA 4.0). [1]

Radio de corte

- La imagen mínima requiere $r_c < L/2$ para evitar dobles conteos.

Impacto en energía

- Errores si el corte es grande o la densidad baja.

Buenas prácticas

- Ajustar r_c y tamaño de caja según la densidad del sistema.

Interacciones de corto alcance

- LJ se trunca a r_c con o sin función de suavizado.

Función switch

$$u_{\text{switch}}(r) = s(r) u(r), \quad s(r) \in [0, 1].$$

- Evita discontinuidades en fuerzas.

Corrección de cola

$$U_{\text{tail}} \approx 2\pi\rho \int_{r_c}^{\infty} r^2 u(r) dr.$$

- Corrige energía y presión al truncar LJ.

Escogiendo r_c

- Mayor r_c mejora precisión, pero aumenta coste.

Implicaciones en estabilidad

- Un corte abrupto puede introducir ruido en la dinámica.

Problema de Coulomb

$$u_C(r) \propto \frac{1}{r} \quad (\text{largo alcance}).$$

- El truncamiento directo produce grandes errores.

$$U = U_{\text{real}} + U_{\text{rec}} + U_{\text{self}}.$$

- Divide Coulomb en suma real y recíproca.

- Particle Mesh Ewald usa FFT para acelerar el cálculo.

Precisión

- Controla el error con parámetros de malla y àlfa de Ewald.

Elección práctica

- Para biomoléculas en solvente, PME es el estándar.

Trayectorias

- Guardar coordenadas y velocidades en intervalos regulares.
- Balance entre almacenamiento y resolución temporal.

Observables

$$\langle A \rangle \approx \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M A_k.$$

- La autocorrelación determina el número efectivo de muestras.

Semillas aleatorias

- Documentar seeds para reproducir termostatos estocásticos.

Checkpoints

- Guardar estados para reiniciar simulaciones largas.

Resumen del episodio

- La integración numérica controla estabilidad y fidelidad.
- Termostatos y barostatos definen el ensemble.
- PBC y electrostática de largo alcance son críticos en biomoléculas.

Referencias I

- [1] Abusaleh AA. *Minimum Image Convention*. CC BY-SA 4.0. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Minimum_Image_Convention.png (visited on 01/12/2026).
- [2] MikeRun. *Leapfrog-method-argument*. CC BY-SA 4.0. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leapfrog-method-argument.svg> (visited on 01/12/2026).
- [3] Christopher Rowley. *Periodic Boundary Conditions in 2D*. CC BY-SA 4.0. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Boundary_Conditions_in_2D.png (visited on 01/12/2026).