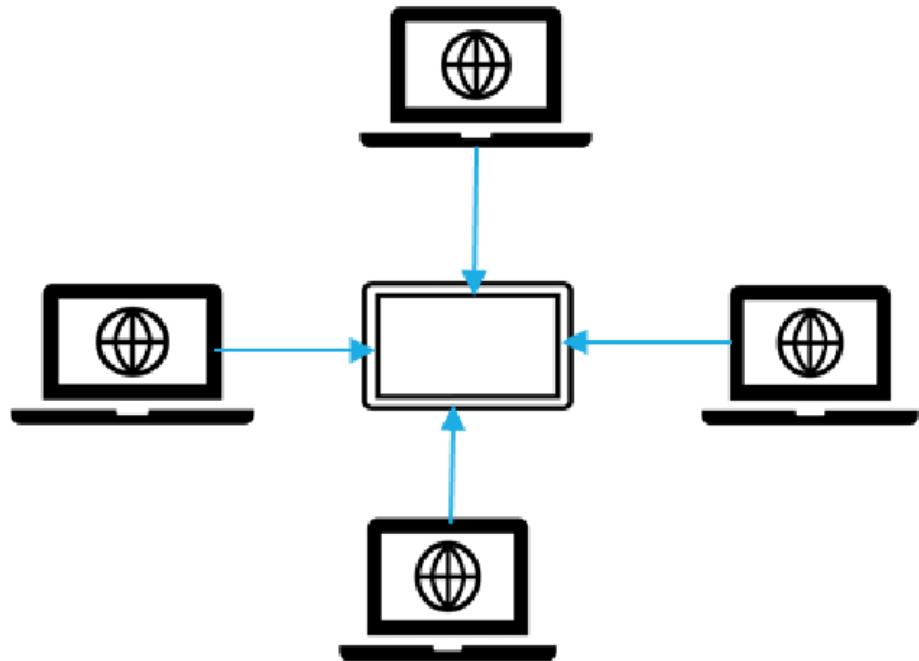


Guía para la creación de un clúster en el sistema operativo Ubuntu

Jose Luciano Caamal Ayala

19 de diciembre de 2025



Índice

1	Introduction	3
2	Conceptos básicos de clústeres	4
3	Componentes	5
3.1	Elementos de interconexión	5
3.2	Equipos de cómputo	5
3.3	Especificaciones técnicas	6
4	Configuración	7
4.1	Configuración en la Laptop A (Servidor / Nodo maestro)	7
4.2	Configuración en la Laptop B (Nodo esclavo)	7
4.3	Verificación de la conexión	8
4.4	Configuración de acceso SSH sin contraseña	9
4.5	Configuración de NFS para compartir la carpeta de OpenFOAM	10
4.6	Configuración de la Laptop B (Cliente NFS)	11
4.7	Verificación del sistema de archivos compartido	11
4.8	Configuración de la ejecución paralela en OpenFOAM	12
4.9	Ejecución de la simulación en paralelo	13
4.10	Solución de errores comunes en la ejecución paralela	14
5	Desconexion y Futuro uso	15
5.1	Desconexión y reutilización del clúster	15

1 Introduction

En diversos contextos académicos y de investigación, ciertos proyectos demandan un nivel de poder de cómputo considerablemente elevado. Bajo estas condiciones, muchos de ellos no pueden desarrollarse de manera adecuada debido a las limitaciones del hardware disponible. Sin embargo, existen alternativas que permiten incrementar la capacidad de procesamiento de forma accesible y eficiente, entre las cuales destaca el uso de clústeres de computación.

En este trabajo se propone el diseño e implementación de un clúster de computación conformado por dos equipos interconectados, utilizando hardware de propósito general y software libre. El objetivo principal es demostrar que es posible construir un entorno de cómputo paralelo funcional sin necesidad de infraestructura especializada, permitiendo la ejecución de aplicaciones que se benefician del paralelismo.

El clúster desarrollado tiene un enfoque principalmente educativo y experimental, orientado al aprendizaje de conceptos fundamentales como el cómputo distribuido, la comunicación entre nodos y la administración de sistemas basados en Linux. A lo largo de este documento se describen las características del hardware empleado, la configuración del sistema operativo, la interconexión de los equipos y los pasos necesarios para su correcta puesta en funcionamiento.

2 Conceptos básicos de clústeres

Un clúster de computación es un conjunto de computadoras independientes, denominadas *nodos*, que se encuentran interconectadas y trabajan de manera coordinada para funcionar como un solo sistema. El objetivo principal de un clúster es incrementar el poder de cómputo disponible, mejorar el rendimiento de las aplicaciones o facilitar el estudio y la implementación de técnicas de cómputo distribuido.

Los nodos que conforman un clúster pueden ser homogéneos, cuando poseen características de hardware similares, u heterogéneos, cuando presentan diferencias en procesador, memoria, almacenamiento o capacidades gráficas. En ambos casos, la cooperación entre los nodos se logra mediante mecanismos de comunicación que permiten la correcta distribución de tareas y el intercambio eficiente de información.

Existen distintos tipos de clústeres, entre los más comunes se encuentran los siguientes:

- **Clústeres de alto rendimiento (HPC)**: orientados a la ejecución de aplicaciones que requieren un elevado poder de procesamiento, tales como simulaciones numéricas, análisis científico y procesamiento paralelo.
- **Clústeres de alta disponibilidad**: diseñados para garantizar la continuidad del servicio ante posibles fallos de uno o más nodos.
- **Clústeres de balanceo de carga**: utilizados para distribuir eficientemente las tareas entre varios nodos, optimizando el uso de los recursos disponibles.

En el contexto de este proyecto, se implementa un clúster de computación de pequeño tamaño con fines educativos y experimentales. Dicho clúster está conformado por dos nodos heterogéneos interconectados mediante una conexión Ethernet directa, sin el uso de infraestructura de red adicional como routers.

La comunicación entre los nodos se realiza mediante el protocolo TCP/IP sobre la conexión Ethernet. Para la administración remota y la ejecución de comandos se emplea el protocolo SSH, mientras que la ejecución paralela de procesos se apoya en bibliotecas de paso de mensajes como MPI. Esta interconexión directa permite establecer un canal de comunicación dedicado entre los nodos, reduciendo la latencia y simplificando la configuración de red.

3 Componentes

3.1 Elementos de interconexión

- **Cables Ethernet UTP categoría 6:** dos cables de 90 cm de longitud, utilizados para la interconexión física de los equipos (<https://www.steren.com.mx/cable-ethernet-utp-cat-6-de-90-cm.html>).
▲ **Observación:** este componente fue utilizado debido a que uno de los equipos no cuenta con un puerto Ethernet integrado.
- **Switch Fast Ethernet de 5 puertos:** empleado para la interconexión física de los nodos del clúster (<https://www.steren.com.mx/switch-fast-ethernet-de-5-puertos.html>).

3.2 Equipos de cómputo

El clúster se encuentra conformado por dos computadoras portátiles, las cuales cumplen roles específicos dentro del sistema:

- **Equipo A (Nodo maestro):** computadora portátil marca MSI, encargada de la administración del clúster y de la coordinación de las tareas de cómputo.
- **Equipo B (Nodo esclavo):** computadora portátil marca Lenovo, utilizada como nodo de cómputo adicional para la ejecución de procesos paralelos.

3.3 Especificaciones técnicas

Table 1: Especificaciones técnicas del Equipo A (Nodo maestro)

Componente	Especificación
Procesador	13th Gen Intel(R) Core(TM) i5-13420H
Memoria RAM	16 GB
Almacenamiento interno	Topesel Expansion X15 -- 1 TB
Tarjeta gráfica (GPU)	Intel(R) UHD Graphics (2 GB) NVIDIA GeForce RTX 4060 Laptop GPU (4 GB)
Tarjeta de red	Ethernet: Realtek PCIe GbE Family Controller Wi-Fi: Intel(R) Wi-Fi 6E AX211 160 MHz
Sistema operativo	Ubuntu 24.04.3 LTS

Table 2: Especificaciones técnicas del Equipo B (Nodo esclavo)

Componente	Especificación
Procesador	AMD Ryzen 5 5500U with Radeon Graphics
Memoria RAM	12 GB
Tarjeta gráfica (GPU)	AMD Radeon Graphics (Lucienne)
Tarjeta de red	Adaptador de red Ethernet mediante micro USB
Sistema operativo	Ubuntu 24.04.3 LTS

4 Configuración

En esta sección se describen todas las configuraciones necesarias, así como los posibles errores y sus soluciones, para la correcta creación y funcionamiento del clúster.

4.1 Configuración en la Laptop A (Servidor / Nodo maestro)

Inicialmente se realiza la conexión física de los equipos, tal como se muestra en la Figura 1.

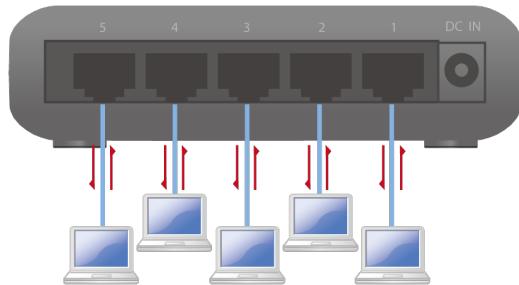


Figure 1: Conexión del switch Fast Ethernet utilizada en el clúster (dos nodos).

Una vez realizada la conexión física, se procede con la configuración de red en el sistema operativo. Abra la **Configuración de Ubuntu** y diríjase a la sección **Red (Network)**.

En el apartado **Cableado (Wired)**, haga clic en el ícono del engranaje para editar la conexión.

Siga los pasos que se describen a continuación:

1. Acceda a la pestaña **IPv4**.
2. Cambie el método de configuración de **Automático (DHCP)** a **Manual**.
3. En la sección **Direcciones**, introduzca los siguientes valores:
 - **Dirección IP:** 192.168.1.1
 - **Máscara de red:** 255.255.255.0
 - **Puerta de enlace:** dejar en blanco o establecer como 0.0.0.0.

Finalmente, haga clic en el botón **Aplicar** para guardar los cambios.

4.2 Configuración en la Laptop B (Nodo esclavo)

Esta laptop será la encargada de recibir instrucciones desde el nodo maestro y procesar una parte de la malla generada por **OpenFOAM**.

Repita los pasos anteriores: **Configuración → Red → Cableado (Wired)** y haga clic en el ícono del **engranaje**.

Configure los siguientes parámetros:

- **Dirección IP:** 192.168.1.2
- **Máscara de red:** 255.255.255.0
- **Puerta de enlace:** dejar en blanco.

Aplique los cambios para finalizar la configuración.

4.3 Verificación de la conexión

Para asegurar que **OpenFOAM** pueda comunicarse correctamente entre los nodos del clúster, es necesario realizar una prueba de conectividad mediante el comando **ping**.

Prueba de conectividad

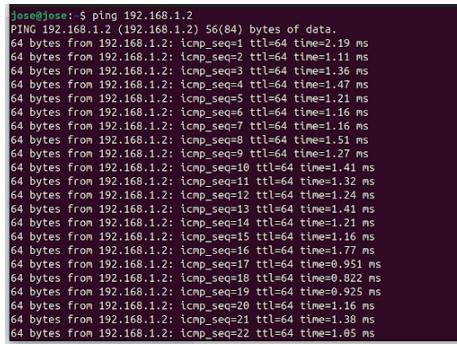
- **Desde la Laptop A (nodo maestro):** Abra una terminal y ejecute el siguiente comando:

```
ping 192.168.1.2
```

- **Desde la Laptop B (nodo trabajador):** Abra una terminal y ejecute el siguiente comando:

```
ping 192.168.1.1
```

Si la configuración es correcta, se deberán recibir respuestas continuas sin pérdida de paquetes como es mostrado en la siguiente imagen, lo que confirma la comunicación entre ambos equipos.



```
jose@jose: ~ ping 192.168.1.2
PING 192.168.1.2 (192.168.1.2) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=1 ttl=64 time=2.19 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=2 ttl=64 time=1.11 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=3 ttl=64 time=1.36 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=4 ttl=64 time=1.47 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=5 ttl=64 time=1.21 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=6 ttl=64 time=1.16 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=7 ttl=64 time=1.16 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=8 ttl=64 time=1.51 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=9 ttl=64 time=1.27 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=10 ttl=64 time=1.41 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=11 ttl=64 time=1.32 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=12 ttl=64 time=1.24 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=13 ttl=64 time=1.41 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=14 ttl=64 time=1.21 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=15 ttl=64 time=1.16 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=16 ttl=64 time=1.77 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=17 ttl=64 time=0.951 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=18 ttl=64 time=0.822 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=19 ttl=64 time=0.925 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=20 ttl=64 time=1.16 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=21 ttl=64 time=1.38 ms
64 bytes from 192.168.1.2: icmp_seq=22 ttl=64 time=1.05 ms
```

Nota importante: Si la prueba de **ping** falla, es posible que el **Firewall de Ubuntu** esté bloqueando la conexión. Para fines de prueba, puede desactivarse temporalmente en ambas laptops ejecutando el siguiente comando:

```
sudo ufw disable
```

Una vez finalizadas las pruebas, se recomienda volver a habilitar el firewall para mantener la seguridad del sistema.

4.4 Configuración de acceso SSH sin contraseña

Para permitir la comunicación remota entre los nodos del clúster sin necesidad de ingresar la contraseña en cada conexión, es necesario configurar el acceso mediante **SSH con llaves públicas**.

1. Instalación del servicio SSH

Asegúrese de que ambas laptops tengan instalado el servicio SSH. Ejecute los siguientes comandos en la terminal de **ambos equipos**:

```
sudo apt update  
sudo apt install openssh-server
```

2. Generación de la llave de acceso (Laptop A)

En la **Laptop A** (nodo maestro, IP 192.168.1.1), genere una llave de seguridad que será utilizada para autenticarse en la Laptop B:

```
ssh-keygen -t rsa
```

Cuando el sistema solicite la ubicación para guardar la llave o una contraseña, presione la tecla **Enter** en cada solicitud (aproximadamente tres veces), aceptando los valores por defecto. Al finalizar, aparecerá una representación gráfica de la llave en la terminal.

3. Copia de la llave pública a la Laptop B

Para autorizar a la Laptop A a conectarse con la Laptop B, ejecute el siguiente comando **desde la Laptop A**:

```
ssh-copy-id jose@192.168.1.2
```

El sistema solicitará la contraseña del usuario **jose** correspondiente a la **Laptop B**. Introduzca la contraseña (los caracteres no se mostrarán en pantalla) y presione **Enter**.

4. Verificación de la conexión (Prueba de funcionamiento)

Finalmente, desde la **Laptop A**, intente acceder a la Laptop B mediante SSH:

```
ssh jose@192.168.1.2
```

```

ed now it is to install the new keys
jose@192.168.1.2's password:

Number of key(s) added: 1

Now try logging into the machine, with: "ssh 'jose@192.168.1.2'"
and check to make sure that only the key(s) you wanted were added.

jose@jose:~$ ssh jose@192.168.1.2
Welcome to Ubuntu 24.04.3 LTS (GNU/Linux 6.14.0-37-generic x86_64)

 * Documentation: https://help.ubuntu.com
 * Management: https://landscape.canonical.com
 * Support: https://ubuntu.com/pro

El mantenimiento de seguridad expandido para Applications está desactivado

Se pueden aplicar 99 actualizaciones de forma inmediata.
Para ver estas actualizaciones adicionales, ejecute: apt list --upgradable

17 actualizaciones de seguridad adicionales se pueden aplicar con ESM Apps.
Aprenda más sobre cómo activar el servicio ESM Apps en https://ubuntu.com/esm

jose@jose:~$ 

```

Figure 2: Ejemplo de conexión exitosa al equipo B.

Si la conexión se establece directamente sin solicitar contraseña, la configuración se ha realizado correctamente.

Para cerrar la sesión remota y regresar a la terminal de la Laptop A, ejecute el comando:

`exit`

4.5 Configuración de NFS para compartir la carpeta de OpenFOAM

El objetivo de esta configuración es que la **Laptop B** pueda acceder a la carpeta de **OpenFOAM** ubicada en la **Laptop A** como si fuera un directorio local. Esto permite que ambos nodos trabajen sobre los mismos casos, mallas y librerías sin duplicar archivos.

Paso 1: Configuración de la Laptop A (Servidor NFS)

Abra una terminal en la **Laptop A** (nodo maestro) y ejecute los siguientes comandos para instalar el servidor NFS:

```

sudo apt update
sudo apt install nfs-kernel-server

```

Configuración de la carpeta a compartir

En este caso, se compartirá la carpeta completa de **OpenFOAM**, de modo que las rutas de librerías y casos coincidan en ambos equipos.

Edite el archivo de configuración de exportaciones NFS:

```
sudo nano /etc/exports
```

Desplácese hasta el final del archivo y agregue la siguiente línea (verifique que la ruta corresponda a su usuario):

```
/home/jose/OpenFOAM 192.168.1.2(rw,sync,no_subtree_check)
```

Guarde los cambios presionando **Ctrl+O**, luego **Enter**, y salga del editor con **Ctrl+X**.

Aplicación de los cambios

Finalmente, aplique la nueva configuración y reinicie el servicio NFS para que los cambios surtan efecto:

```
sudo exportfs -ra  
sudo systemctl restart nfs-kernel-server
```

4.6 Configuración de la Laptop B (Cliente NFS)

Paso 2: Configuración de la Laptop B

Abra una terminal en la **Laptop B** (nodo trabajador) y ejecute los siguientes comandos para instalar el cliente NFS:

```
sudo apt update  
sudo apt install nfs-common
```

Preparación del directorio de montaje

Para que **OpenFOAM** funcione correctamente, es indispensable que la ruta del directorio compartido sea **idéntica** en ambos equipos. Si el directorio ya existe y contiene archivos, estos deben moverse temporalmente a otra ubicación, ya que al montar la carpeta compartida, el contenido local quedará oculto.

Asegúrese de que el directorio exista ejecutando:

```
mkdir -p /home/jose/OpenFOAM
```

Montaje de la carpeta compartida

Conecte la carpeta compartida de la **Laptop A** a la **Laptop B** mediante el siguiente comando:

```
sudo mount 192.168.1.1:/home/jose/OpenFOAM /home/jose/OpenFOAM
```

4.7 Verificación del sistema de archivos compartido

Paso 3: Prueba de “espejo”

El directorio APP2 es el que yo estoy trabajando en este caso sera el directorio que trabajaran. Para verificar que el sistema de archivos compartido funciona correctamente, realice la siguiente prueba:

- **En la Laptop A:**

Acceda a la carpeta del caso de OpenFOAM:

```
cd ~/OpenFOAM/jose-13/run/tutorials/fluid/APP2
```

Cree un archivo de prueba:

```
touch pruebaConexion.txt
```

- **En la Laptop B:**

Acceda a la misma ruta:

```
cd ~/OpenFOAM/jose-13/run/tutorials/fluid/APP2
```

Liste el contenido del directorio:

```
ls
```

Si el archivo `pruebaConexion.txt` aparece también en la **Laptop B**, el sistema de archivos compartido se ha configurado correctamente y ambos equipos están trabajando sobre el mismo entorno de archivos.

4.8 Configuración de la ejecución paralela en OpenFOAM

1. Configuración de la división del dominio (`decomposeParDict`)

Para que **OpenFOAM** pueda ejecutar la simulación de manera paralela, es necesario indicar en cuántas partes se dividirá el dominio computacional.

Edite el archivo de configuración correspondiente desde el directorio del caso:

```
nano system/decomposeParDict
```

Modifique el parámetro `numberOfSubdomains` de acuerdo con el número total de núcleos que se utilizarán en el clúster. Por ejemplo, si se emplean **8 núcleos** de la Laptop MSI y **8 núcleos** de la Laptop Lenovo, el valor debe ser:

```
numberOfSubdomains 16;
```

Asimismo, verifique que el método de descomposición esté configurado como `hierarchical` o `scotch`, ya que ambos son adecuados para ejecución distribuida:

```
method scotch;
```

2. Creación del archivo de máquinas (hosts)

El archivo `hosts` indica al comando `mpirun` cuáles serán los equipos que participarán en la ejecución paralela y cuántos núcleos aportará cada uno.

Desde el directorio del caso, cree y edite el archivo:

```
nano hosts
```

Agregue las direcciones IP de las laptops junto con el número de núcleos asignados a cada una. Suponiendo que se utilizarán **4 núcleos por máquina**, el archivo debe contener lo siguiente:

```
192.168.1.1 slots=8  
192.168.1.2 slots=8
```

Guarde los cambios presionando `Ctrl+O`, luego `Enter`, y salga del editor con `Ctrl+X`.

4.9 Ejecución de la simulación en paralelo

3. Ejecución de la simulación

Una vez configurada la descomposición del dominio y el archivo de máquinas, la simulación puede ejecutarse de manera paralela desde la **Laptop A** (nodo maestro).

Ejecute los siguientes comandos en el orden indicado desde el directorio del caso de OpenFOAM:

- **Preparación de la malla:**

```
blockMesh
```

- **División del dominio:** Este comando generará directorios con nombre `processor0`, `processor1`, etc.

```
decomposePar
```

- **Lanzamiento de la simulación en el clúster:**

```
mpirun -np 16 foamRun -parallel
```

4. Verificación del uso de recursos en la Laptop B

Para confirmar que la **Laptop B** está participando activamente en la simulación, realice la siguiente verificación mientras el proceso se encuentra en ejecución:

- En la **Laptop B**, abra una terminal y ejecute:

```
htop
```

Deberán observarse múltiples procesos del solver de OpenFOAM (por ejemplo, `simpleFoam`) utilizando aproximadamente el **100%** de los núcleos asignados a este equipo, lo que confirma que el cálculo se está distribuyendo correctamente entre los nodos del clúster.

4.10 Solución de errores comunes en la ejecución paralela

Durante la ejecución de OpenFOAM en el clúster, puede aparecer el siguiente error al lanzar la simulación en paralelo:

```
mpirun --hostfile hosts -np 16 foamRun -parallel  
Authorization required, but no authorization protocol specified  
...  
mpirun was unable to find the specified executable file  
Node: 192.168.1.2  
Executable: /opt/openfoam13/platforms/linux64GccDPInt320pt/bin/foamRun  
8 total processes failed to start
```

Este error indica principalmente dos problemas:

- Falta de autorización para acceder a la interfaz gráfica (X11).
- La **Laptop B** no está cargando correctamente el entorno de **OpenFOAM**, por lo que no encuentra el ejecutable **foamRun**.

1. Configuración del archivo `.bashrc` (**Laptop B**)

Este es el paso más importante. Ubuntu incluye una protección en el archivo `.bashrc` que impide cargar variables de entorno cuando el acceso no es interactivo (como en conexiones SSH usadas por `mpirun`).

En la **Laptop B**, edite el archivo:

```
nano ~/.bashrc
```

Busque al inicio del archivo las siguientes líneas (generalmente dentro de las primeras 5 a 10):

```
# If not running interactively, don't do anything  
case $- in  
  *i*) ;;  
  *) return;;  
esac
```

Tiene dos opciones válidas:

- Cortar estas líneas y pegarlas al final del archivo.
- O comentar la línea `*) return;;` anteponiendo un `#`.

Además, asegúrese de que al final del archivo esté presente la siguiente línea:

```
source /opt/openfoam13/etc/bashrc
```

Guarde los cambios y cierre el editor.

2. Permitir acceso gráfico (Laptop A)

El mensaje `Authorization required` aparece porque el proceso remoto intenta interactuar con el servidor gráfico (X11) y este lo bloquea.

En la **Laptop A**, ejecute el siguiente comando:

```
xhost +
```

Este comando permite temporalmente que procesos externos interactúen con la pantalla local.

3. Verificación de la ejecución remota

Antes de lanzar la simulación completa, es recomendable verificar que la **Laptop A** puede ejecutar correctamente comandos de OpenFOAM en la **Laptop B**.

Desde la **Laptop A**, ejecute:

```
ssh 192.168.1.2 "foamRun -help"
```

- Si se muestra la ayuda de OpenFOAM, el entorno está correctamente configurado.
- Si aparece el mensaje `command not found`, el entorno aún no se está cargando correctamente en la Laptop B.

4. Lanzamiento final de la simulación

Una vez verificada la correcta ejecución remota, acceda al directorio del caso en la **Laptop A** y ejecute nuevamente la simulación paralela:

```
cd ~/OpenFOAM/jose-13/run/tutorials/fluid/APP2  
mpirun --hostfile hosts -np 16 foamRun -parallel
```

Si la simulación inicia sin errores y ambos equipos presentan carga de CPU, el clúster se encuentra funcionando correctamente.

5 Desconexión y Futuro uso

5.1 Desconexión y reutilización del clúster

Desconexión del sistema (al finalizar la simulación)

Una vez concluida la simulación, es importante realizar una desconexión correcta del sistema de archivos compartido para evitar errores o pérdida de datos.

- **Desmontar la carpeta compartida en la Laptop B:**

Antes de desconectar el cable Ethernet, se debe indicar a la **Laptop B** que deje de acceder a los archivos ubicados en la **Laptop A**.

```
sudo umount -l /home/jose/OpenFOAM
```

En caso de que aparezca el error **dispositivo ocupado**, asegúrese de cerrar todas las terminales o procesos que se encuentren utilizando dicha carpeta en la Laptop B.

- **Desconexión física del cable:**

Una vez desmontado correctamente el sistema de archivos, puede desconectarse el cable Ethernet de manera segura.

Reutilización del clúster en sesiones posteriores

Gracias a que la configuración principal ya fue realizada, la reutilización del clúster en otro momento es un proceso rápido y sencillo:

1. Conecte el cable Ethernet entre ambas laptops.
2. Verifique que ambas máquinas conserven las direcciones IP configuradas:
 - Laptop A: 192.168.1.1
 - Laptop B: 192.168.1.2
3. Monte nuevamente la carpeta compartida en la **Laptop B** ejecutando:

```
sudo mount 192.168.1.1:/home/jose/OpenFOAM /home/jose/OpenFOAM
```

4. Realice una prueba rápida verificando que los archivos sean visibles:

```
ls ~/OpenFOAM/jose-13/...
```

Si los archivos aparecen correctamente, el sistema de archivos compartido se encuentra activo.

5. Finalmente, ejecute nuevamente la simulación en paralelo desde la **Laptop A** utilizando el comando `mpirun`.