SOFTWARE-DEFINED NETWORK

Proyecto Integrado | IES Gonzalo Nazareno

Curso 2024/2025

Miguel Figueroa Escribano

Índice

1. OBJETIVOS

El principal objetivo de este proyecto es implementar y desarrollar una solución de redes definidas por software (SDN) en un entorno basado en Proxmox, lo que permitirá dotar a la infraestructura de una serie de funcionalidades avanzadas que van más allá de la simple conectividad entre máquinas virtuales. Al introducir esta característica, se busca conseguir, entre otras cosas, la creación de redes privadas completamente aisladas por cada nodo, la posibilidad de establecer redes superpuestas que abarquen varios clústeres y la habilitación de escenarios multiusuario o multitenant, donde distintos grupos de usuarios puedan trabajar de forma segura y segmentada dentro de la misma plataforma.

Durante el desarrollo del proyecto, se abordarán diferentes casos prácticos que evidenciarán el valor añadido de la solución propuesta. Por ejemplo, se diseñarán y desplegarán redes virtuales aisladas específicamente para distintos grupos de máquinas virtuales, lo que permitirá garantizar la segmentación y la seguridad de los entornos. Además, se realizarán pruebas exhaustivas de conectividad y de aislamiento entre las diferentes redes, asegurando que solo las máquinas virtuales autorizadas puedan comunicarse entre sí y que no existan fugas de información entre redes independientes.

Otro aspecto importante será la integración de un sistema de asignación automática de direcciones IP mediante un servicio de DHCP, lo que facilitará la gestión y el escalado de las redes virtuales sin intervención manual. Finalmente, se evaluará la escalabilidad del entorno SDN, añadiendo nuevas redes o nodos al sistema y verificando que estos elementos se integran correctamente y que el rendimiento y la funcionalidad se mantienen estables a medida que crece la infraestructura. En definitiva, este proyecto pretende no solo demostrar la viabilidad técnica de la solución, sino también resaltar las ventajas prácticas que aporta en términos de flexibilidad, seguridad y gestión avanzada de redes en entornos virtualizados.

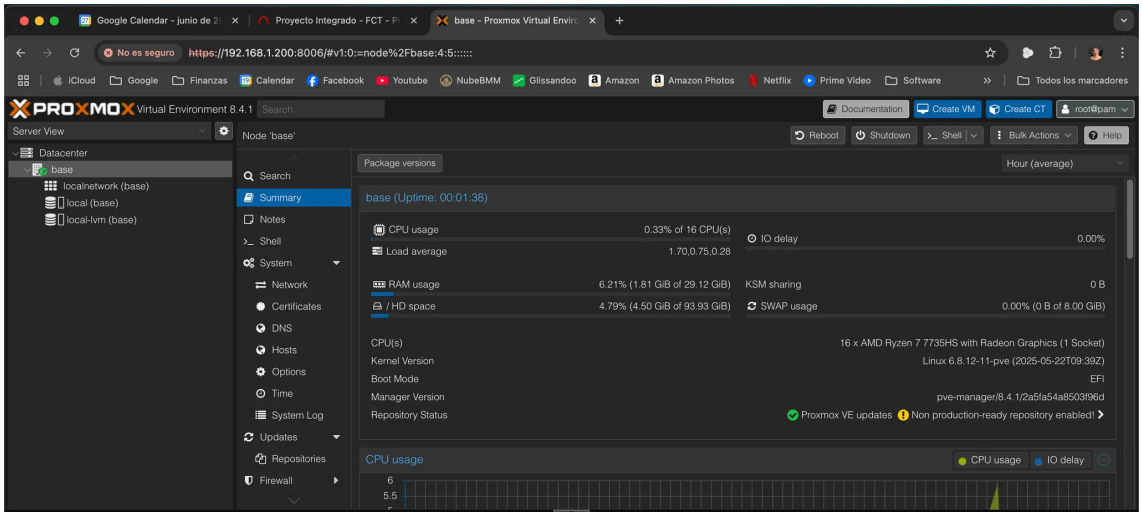
2. ESCENARIO

Para la realización del proyecto hemos montado el escenario en un servidor local, concretamente en un mini PC de las siguientes características:

- MinisForum UM773 Lite
- AMD Ryzen 7 7735HS
- 32GB RAM
- 1TB SSD

Este servidor está ubicado en la red de mi vivienda, que tiene configurada una IP fija con la compañía Avatel (la siguiente dirección apunta hacia esta red → jaen.miguelfigueroa.es)

Sobre él hemos instalado un Proxmox VE 8.4, al que le hemos asignado una IP estática dentro de nuestra red local que es la `192.168.1.200/24`. Esta máquina será la que nos servirá de base (la llamaremos la máquina `base`) para montar el resto del escenario.

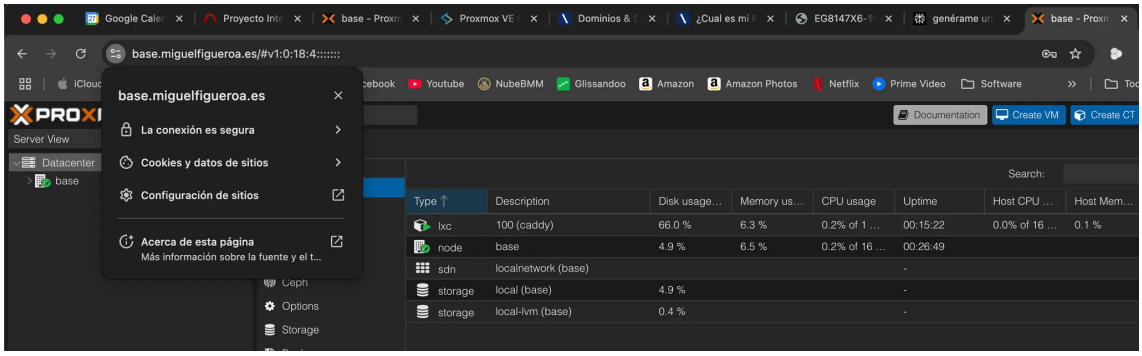


Una vez tenemos ya el equipo `base` funcionando, crearemos un contenedor que nos permitirá acceder desde el exterior a la interfaz web de Proxmox de la máquina.

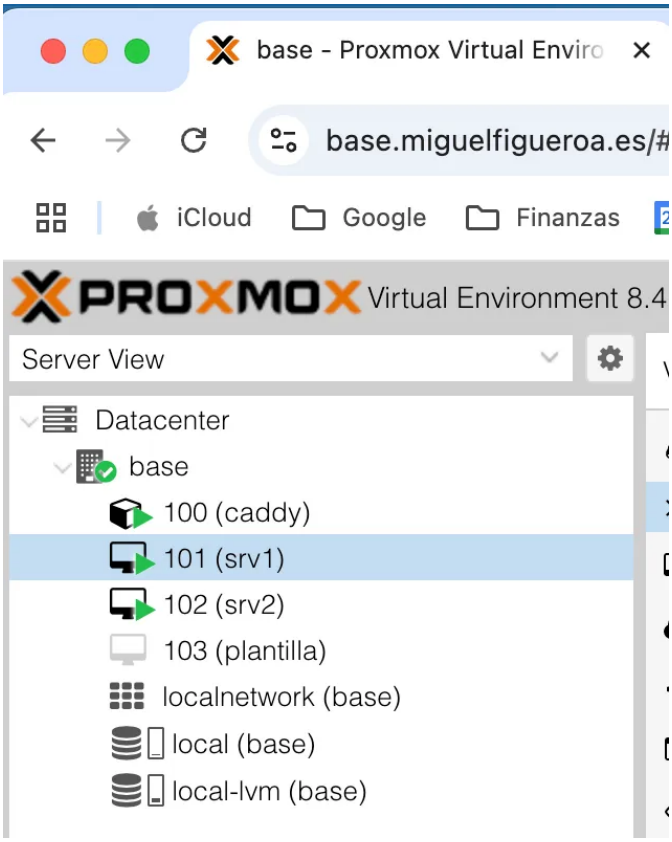
Para ello, con la ayuda de este proyecto de la comunidad https://community-scripts.github.io/ProxmoxVE/, desplegaremos un contenedor Caddy, que es un servidor web y que nos servirá de proxy inverso. Este contenedor LXC tiene asignada la IP estática `192.168.1.201/24`. En él, configuramos el `Caddyfile` con el siguiente contenido:

```
base.miguelfigueroa.es {
    reverse_proxy <https://192.168.1.200:8006> {
        transport http {
            tls_insecure_skip_verify
        }
    }
}
```

Configuramos el reenvío de los puertos 80 y 443 de nuestro router hacia el contenedor `caddy` y ya tenemos acceso a nuestra interfaz de Proxmox desde el exterior a través de la URL https://base.miguelfigueroa.es



Ahora, dentro de `base`, crearemos dos nuevas máquinas virtuales que serán dos nodos de Proxmox. Una vez instalados ambos nodos haremos una copia de seguridad de uno de ellos, por si estropeamos algo del escenario o para futuras pruebas que haremos.



De la misma forma que hicimos antes, añadiremos a nuestro dominio los accesos a la interfaz web de los nodos `srv1` y `srv2`, añadiendo primero los registros CNAME en nuestro dominio y posteriormente añadiendo las direcciones públicas de los nodos al archivo `Caddyfile` de nuestro proxy inverso:

2.1 TABLAS RESUMEN DEL ESCENARIO

Tabla resumen de IPs del escenario	
192.168.1.200	Nodo PVE - base
192.168.1.201	CT – Caddy
192.168.1.202	Nodo PVE (VM) – srv1
192.168.1.203	Nodo PVE (VM) – srv2
192.168.1.204	Nodo PVE (VM) – srv3 *No funcionando, preparado para exposición*

Tabla resumen registros DNS del dominio miguelfigueroa.es		
A	jaen	45.8.49.181
CNAME	base	jaen.miguelfigueroa.es
CNAME	srv1	jaen.miguelfigueroa.es
CNAME	srv2	jaen.miguelfigueroa.es
CNAME	srv3	jaen.miguelfigueroa.es

2.2 VPN PARA ACCESO EXTERIOR

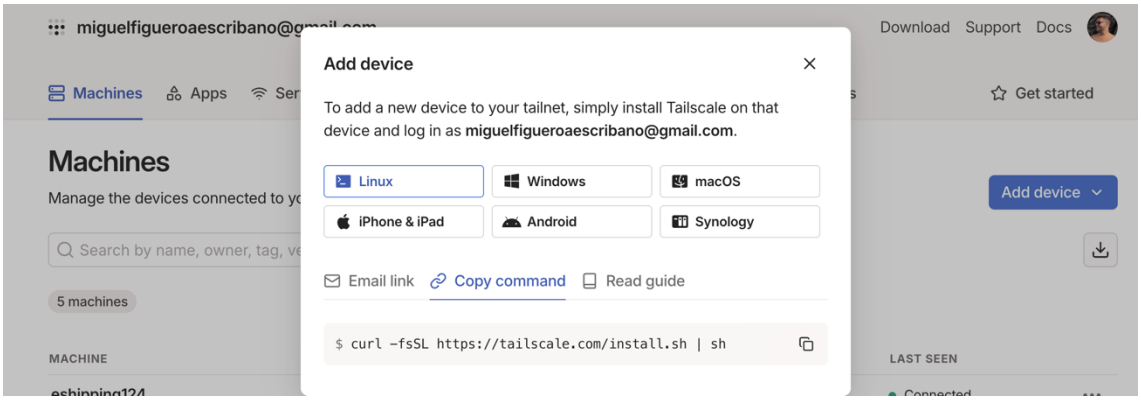
Para acceder desde fuera de la red local donde está montado el escenario usaremos una VPN, en este caso **Tailscale**.

Tailscale es una solución de VPN de última generación que permite crear redes privadas virtuales de forma sencilla y segura entre dispositivos distribuidos en diferentes ubicaciones y redes. A diferencia de los VPN tradicionales, Tailscale utiliza el protocolo WireGuard para establecer conexiones punto a punto cifradas, formando una red privada (tailnet) donde solo los dispositivos autorizados pueden comunicarse entre sí.

Su principal ventaja es la facilidad de uso: basta con instalar el cliente en cada dispositivo y autenticarse para que automáticamente se configuren las conexiones, sin necesidad de cambios complejos en routers o firewalls. Tailscale gestiona el descubrimiento de dispositivos, el cruce de NAT y la asignación de IPs privadas, permitiendo que los dispositivos se conecten directamente siempre que sea posible, o a través de relay si no lo es.

Además, Tailscale ofrece control de acceso granular basado en identidades de usuario, integración con proveedores de identidad (como Google o Microsoft Entra ID), y políticas de acceso centralizadas, facilitando la adopción de arquitecturas Zero Trust y la segmentación de la red. Su enfoque mesh evita cuellos de botella y puntos únicos de fallo, mejorando el rendimiento y la fiabilidad respecto a VPNs centralizadas.

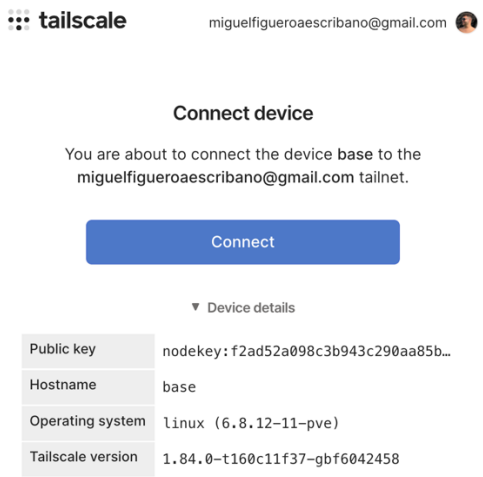
Para la instalación, deberemos añadir nuestro servidor `base` a nuestra tailnet, y ya desde él saltaremos a los distintos nodos, máquinas virtuales y contenedores. Para ello accedemos al panel web y añadimos un nuevo dispositivo Linux, donde nos da el comando de instalación para ejecutar directamente en nuestro nodo de Proxmox.



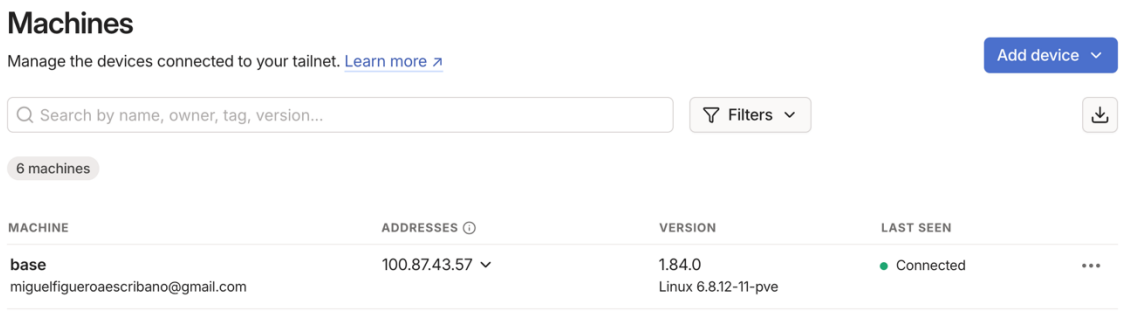
Ejecutamos la shell desde la interfaz web de Proxmox y lanzamos el comando obtenido anteriormente. Una vez instalado Tailscale, lanzamos el siguiente comando para levantar el servicio:

```
tailscale up
```

Nos proporciona ese link al que accederemos, nos logueamos con nuestra cuenta y confirmamos que queremos agregar este dispositivo a nuestra tailnet:



Una vez agregado ya podemos comprobar desde el panel de control de Tailscale los dispositivos que están unidos a nuestra tailnet, que son lo mismos desde los que podemos acceder a ellos:



Ahora nos conectamos desde otro dispositivo ya fuera de la red local y que tenemos agregado a nuestra tailnet, introducimos la IP proporcionada por la VPN y comprobamos que podemos conectarnos:

```
miguel@Mac-mini-de-Miguel ~ % ssh root@100.87.43.57
The authenticity of host '100.87.43.57 (100.87.43.57)' can't be established.
ED25519 key fingerprint is SHA256:EpTt7UZTzfA5a6fztW5hydy4Wpo3h98+cq9Lj8DkgDo.
This key is not known by any other names.
Are you sure you want to continue connecting (yes/no/[fingerprint])? yes
Warning: Permanently added '100.87.43.57' (ED25519) to the list of known hosts.
root@100.87.43.57's password:
Linux base 6.8.12-11-pve #1 SMP PREEMPT_DYNAMIC PMX 6.8.12-11 (2025-05-22T09:39Z
) x86_64

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Sun Jun 15 19:50:58 2025
root@base:~#
```

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CONCEPTOS

A partir de la versión 8, Proxmox VE incluyó la característica de las SDN (software-defined networks). Esta funcionalidad permite la creación, gestión y control centralizado de redes virtuales de manera dinámica y programable.

Entre sus características principales, permite crear zonas virtuales redes virtuales (VNets) directamente desde la interfaz web, permite la segmentación de red para mejorar la seguridad y simplificar la gestión de topologías complejas, centraliza el control de la red, permite la asignación dinámica de recursos de red ajustando el ancho de banda y garantizando que las aplicaciones reciban los recursos necesarios según la demanda, y permite también la integración de servicios como DHCP e IPAM para la gestión automática de direcciones IP.

3.1 SDN

Las Software-Defined Networking (SDN) es un concepto arquitectónico que separa el plano de control (gestión de políticas y rutas) del plano de datos (reenvío de tráfico), permitiendo redes programables y centralizadas. En Proxmox, SDN se integra directamente con el hipervisor para gestionar redes virtualizadas de forma ágil.

Sus características claves son:

- Abstracción de la red física: Las redes se definen mediante software, independientemente del hardware subyacente.
- Automatización: Configuración dinámica de VLANs, subredes y políticas de seguridad.
- Multitenant: Aislamiento lógico de redes para distintos usuarios o cargas de trabajo.

3.2 SDN EN PROXMOX

Zonas

- Una zona es un área virtual de red separada dentro de Proxmox SDN. Define el tipo de red (por ejemplo, simple, VLAN, VXLAN, EVPN, etc.) y determina cómo se comportan las redes virtuales dentro de ella.
- Las zonas permiten aislar redes y controlar cómo se conectan y enrutan las máquinas virtuales (MV) y contenedores dentro del clúster.
- Es como una especie de “LAN virtual” dentro de la infraestructura.

VNets

- Una VNet (Virtual Network) es una red virtual que se crea dentro de una zona. Funciona como un switch virtual (puente) al que se conectan las MV y contenedores.
- Cada VNet puede tener uno o varios subredes asociadas, y se despliega localmente en cada nodo del clúster.
- Las VNets permiten segmentar el tráfico y definir dominios de broadcast independientes dentro de una zona.

Options

- Se refiere a las opciones de configuración disponibles tanto para zonas como para VNets. Estas opciones determinan el comportamiento de la red virtual, como la activación de DHCP, la configuración de gateways, la selección del backend de IPAM, el tipo de aislamiento, etc.
- Por ejemplo, puedes habilitar DHCP automático para una zona simple o definir rangos de direcciones IP para una subred dentro de un VNet.

IPAM (IP Address Management)

- IPAM es la gestión de direcciones IP dentro del entorno SDN. Proxmox utiliza IPAM para asignar, liberar y rastrear direcciones IP de las máquinas virtuales y contenedores de forma automática. El plugin IPAM

integrado permite ver y administrar las asignaciones de IP desde la interfaz, y existen integraciones con soluciones externas como NetBox o phpIPAM.

- Por ejemplo, cuando una VM se conecta a un VNet con DHCP habilitado, IPAM asigna automáticamente una IP libre del rango configurado y mantiene el registro de esa asignación.

VNet Firewall

- El VNet Firewall es la integración del firewall de Proxmox con las redes definidas por SDN. El sistema genera automáticamente IPSets (listas de IPs o rangos) para cada VNet y sus subredes, que pueden ser usados en las reglas del firewall para controlar el tráfico de red. Por ejemplo, se crean conjuntos como `vnet-all` (todas las subredes del VNet), `vnet-gateway` (IP de gateways), `vnet-no-gateway` (subredes excluyendo gateways) y `vnet-dhcp` (rango DHCP).
- Esto permite crear reglas de firewall específicas para cada VNet o subconjunto de direcciones, facilitando la administración segura y dinámica del tráfico entre redes virtuales.

4. DESCRIPCIÓN

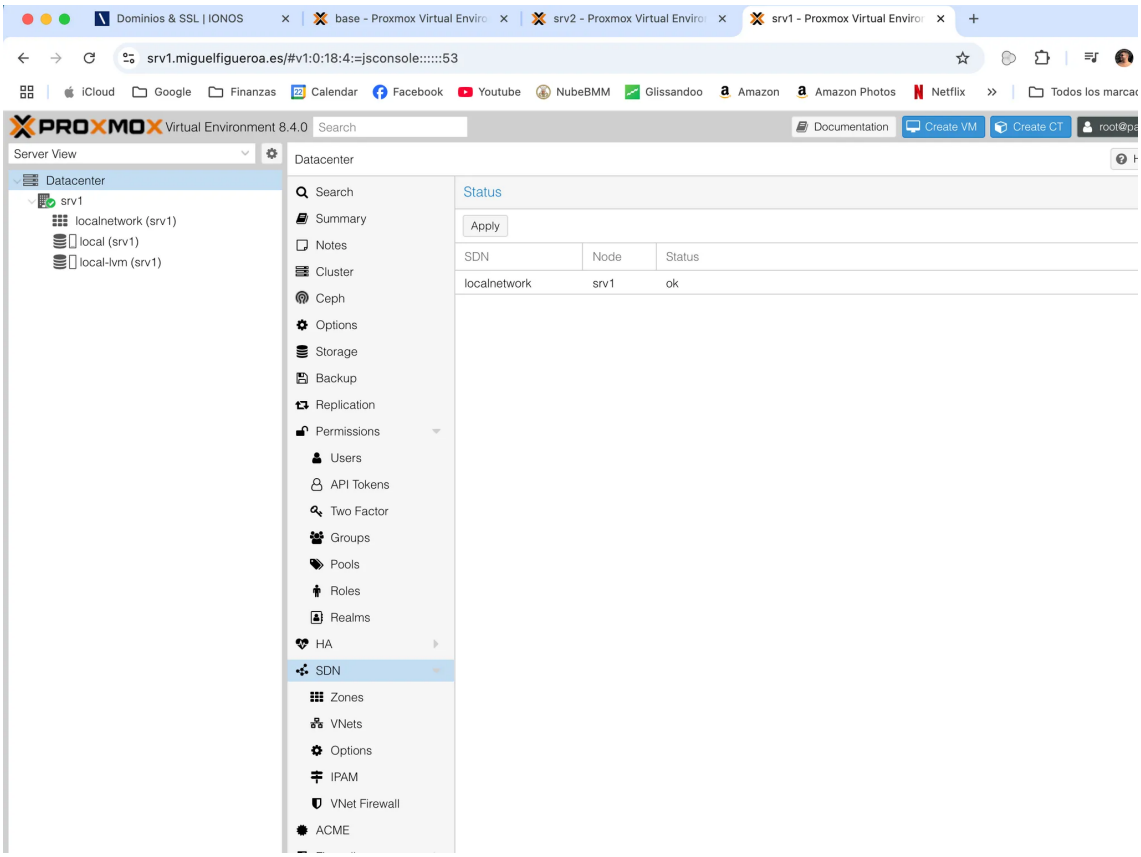
Una vez montado el escenario, accedemos a nuestro nodo `srv1`. En él deberemos realizar algunas configuraciones para que las SDN funcionen sin problema. Para ello, en primer lugar, deberemos instalar el paquete `dnsmasq` .

```
apt install dnsmasq
```

Tras esto, deberemos editar el archivo `/etc/network/interfaces` y añadir la siguiente línea al final del mismo si no está:

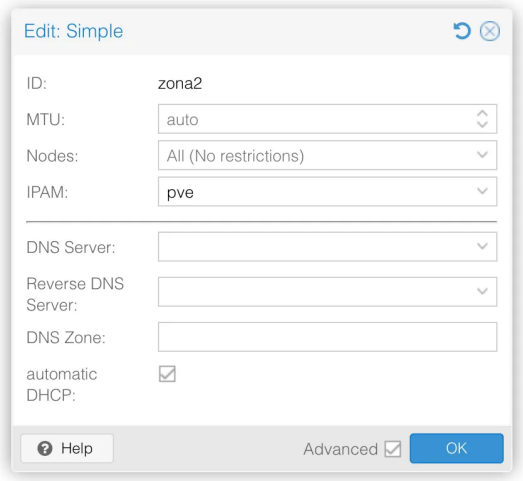
```
source /etc/network/interfaces.d/*
```

Con esto verificado ya podemos acceder al apartado SDN de la interfaz web de Proxmox:

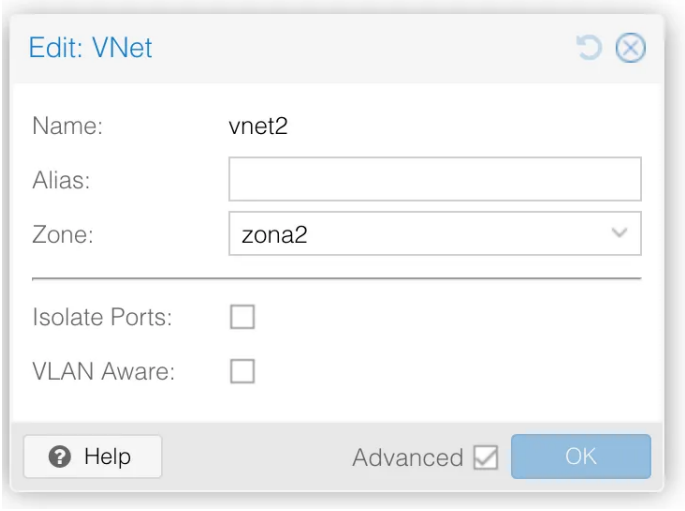


Una vez aquí crearemos una nueva zona de prueba. Será de tipo “Simple” y la llamaremos `zona2`. La configuraremos con el MTU automático y disponible para todos los nodos del cluster, aunque ahora mismo sólo tengamos 1.

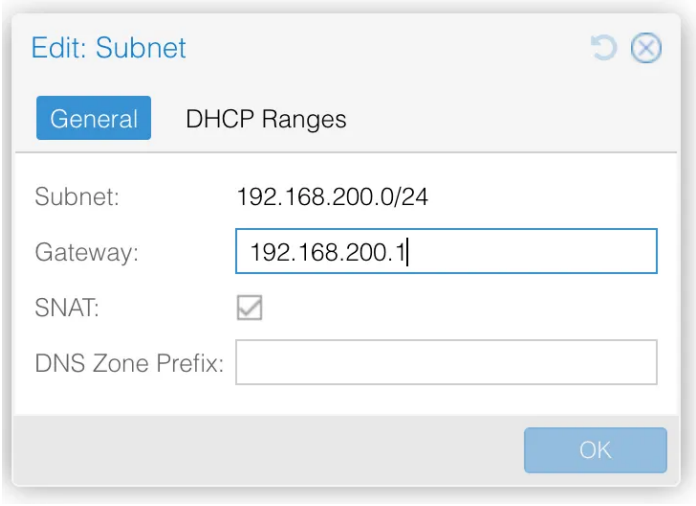
También deberemos activar la opción “automatic DHCP”, dentro del menú “Advanced” y que configuraremos más adelante en la subnet:



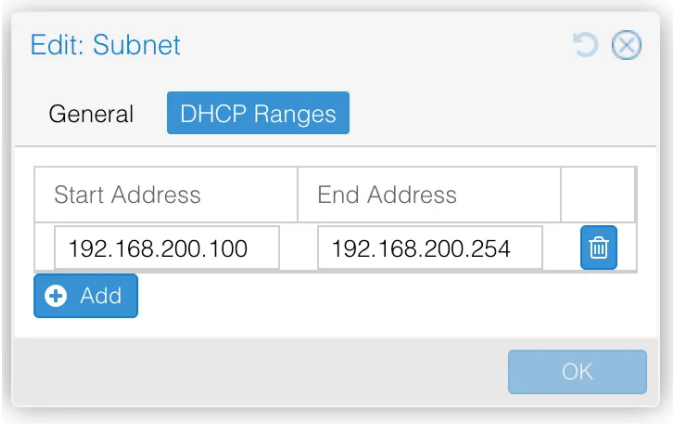
Con la zona ya creada, pasaremos a crear una red y posteriormente una subred. Para ello, nos dirgimos al apartado “VNets” y crearemos una nueva “VNet”:



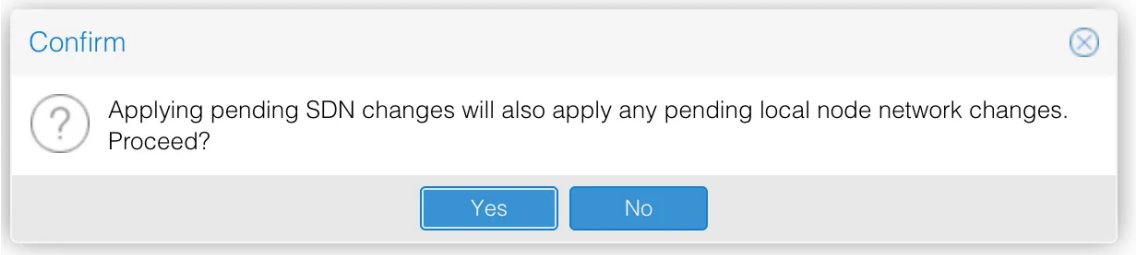
Con esta red creada la seleccionamos y justo en la ventana lateral de “Subnets” crearemos una nueva, con el direccionamiento `192.168.100.0/24`:



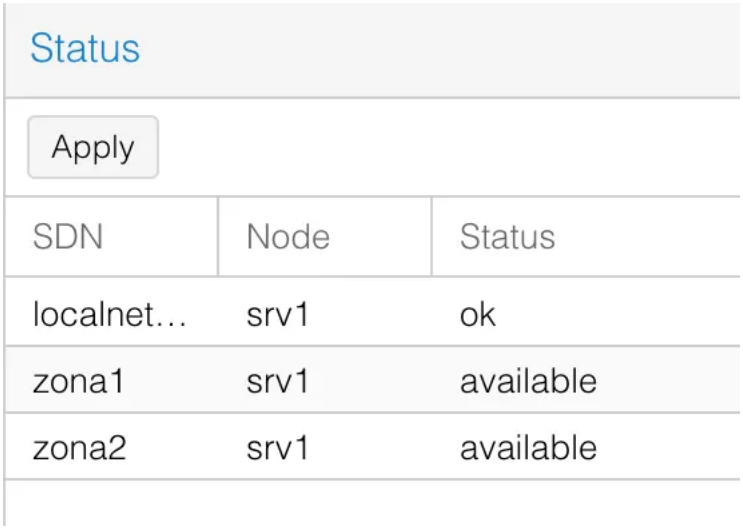
Habilitaremos la opción de SNAT para que todas las máquinas que coloquemos dentro de esta subred puedan salir al exterior y además en la pestaña de "DHCP Ranges" le asignaremos un rango de direcciones para que el servidor DHCP de esta subred pueda asignar IPs a las máquinas que coloquemos en esta subred:



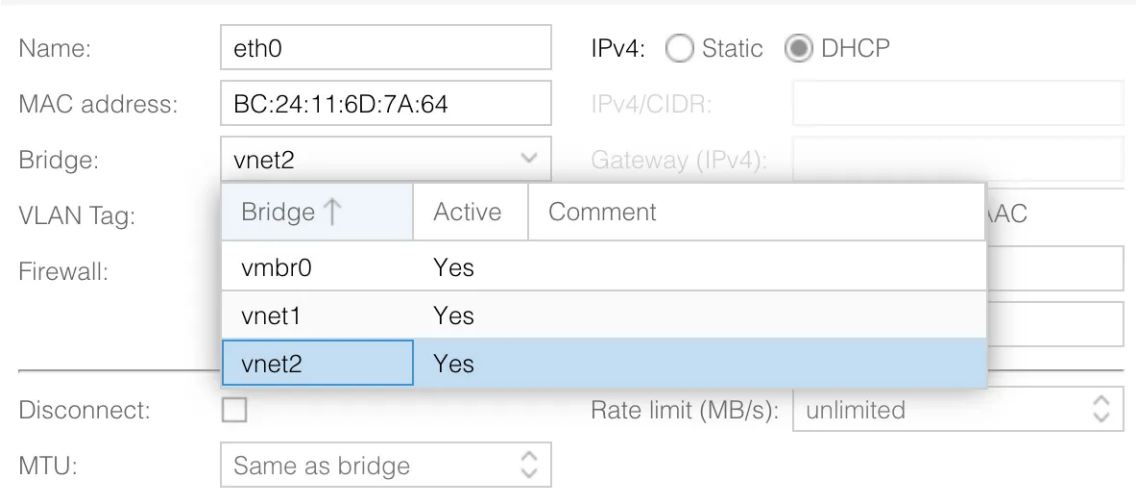
Creamos la subred y ahora comprobamos que tanto la VNet como la subnet están pendiente de cambios. Para aplicar estos cambios debemos dirigirnos al apartado de "SDN" y clickar en el botón de aplicar. Confirmamos:



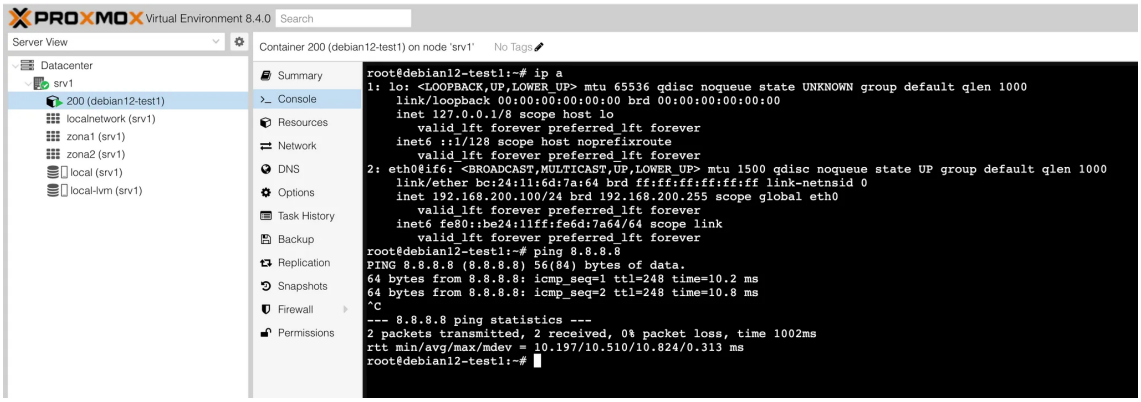
Una vez confirmamos se recargan todas las configuraciones de red de los nodos y ya observamos como aparece la zona2 como disponible:



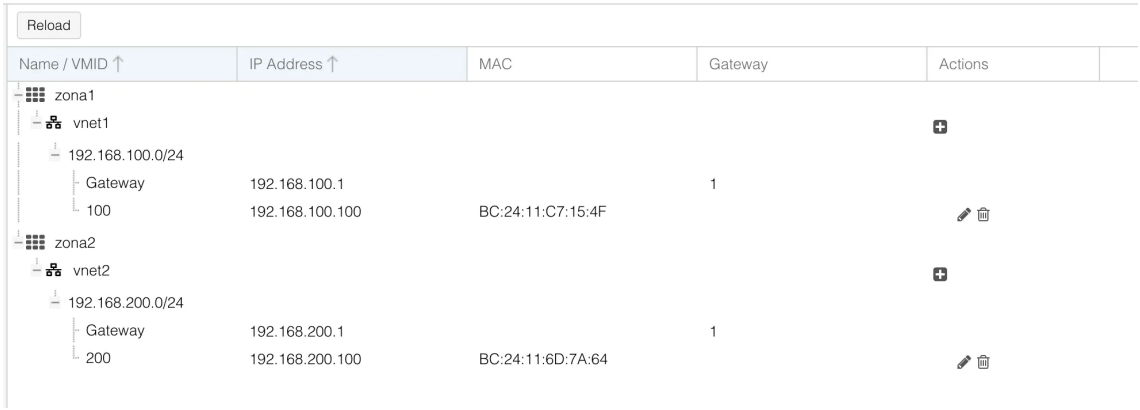
Para hacer una primera comprobación de esta zona, su red y su subred está funcionando correctamente lanzaremos la ejecución de un contenedor de debian12. Avanzamos en la creación del contenedor en Proxmox como solemos hacer y al llegar a la pestaña “Network” observamos que podemos seleccionar como bridge la `vnet2` que creamos anteriormente. La seleccionamos y además activaremos que obtenga una dirección IPv4 por DHCP.



Terminamos de configurar el contenedor, lanzamos su creación y accedemos a él:



Comprobamos que ha obtenido la IP `192.168.200.100/24`, que está dentro del rango DHCP que le hemos asignado a la subnet y además tiene conectividad con el exterior. Si nos dirigimos a la pestaña “IPAM” observamos de forma gráfica todo los componentes de las SDN, así como sus clientes e IPs asignadas. También podemos hacer modificaciones o mapeos de MACs con IPs de forma manual:



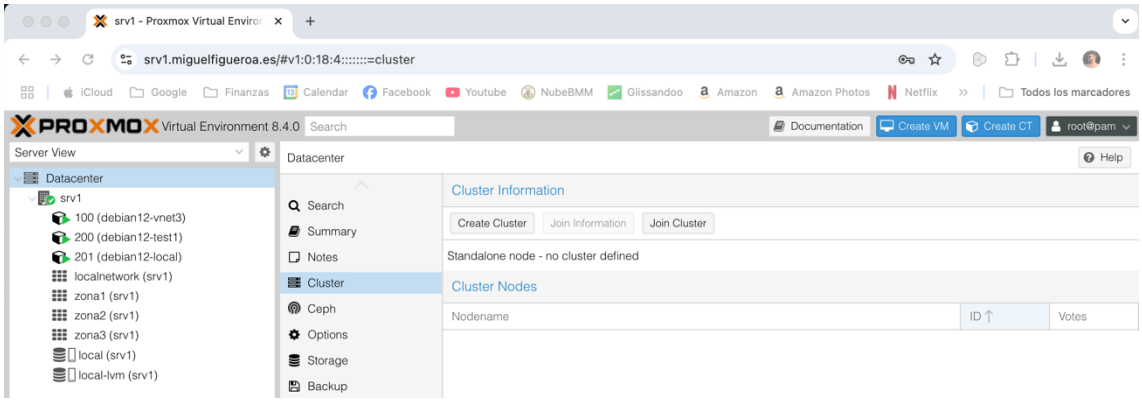
Además, ahora mismo el CT que hemos creado tiene alcance al resto de dispositivos de la red local, por ejemplo a nuestro equipo que tiene la IP 192.168.1.110:

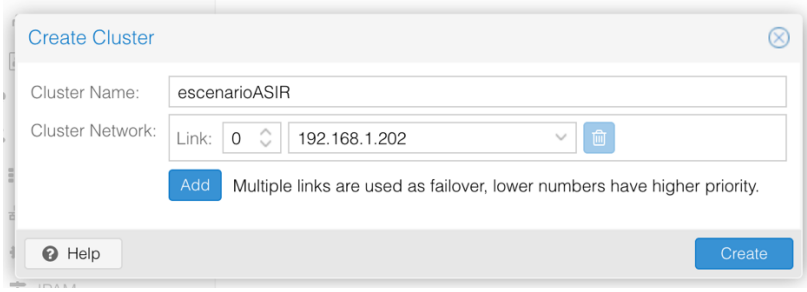
```
root@debian12-test1:~# ping 192.168.1.110
PING 192.168.1.110 (192.168.1.110) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.1.110: icmp_seq=1 ttl=63 time=0.612 ms
64 bytes from 192.168.1.110: icmp_seq=2 ttl=63 time=0.613 ms
64 bytes from 192.168.1.110: icmp_seq=3 ttl=63 time=0.577 ms
64 bytes from 192.168.1.110: icmp_seq=4 ttl=63 time=0.568 ms
^C
--- 192.168.1.110 ping statistics ---
4 packets transmitted, 4 received, 0% packet loss, time 3072ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.568/0.592/0.613/0.020 ms
root@debian12-test1:~# traceroute 192.168.1.110
traceroute to 192.168.1.110 (192.168.1.110), 30 hops max, 60 byte packets
 1  192.168.200.1 (192.168.200.1)  0.037 ms  0.009 ms  0.007 ms
 2  192.168.1.110 (192.168.1.110)  0.361 ms  0.326 ms *
root@debian12-test1:~#
```

Para concluir con esta primera prueba lanzaremos un nuevo CT que estará en la zona3, y que tendrá direccionamiento `10.0.0.0/24` y comprobamos que tiene conectividad con el CT que está en la vnet2:

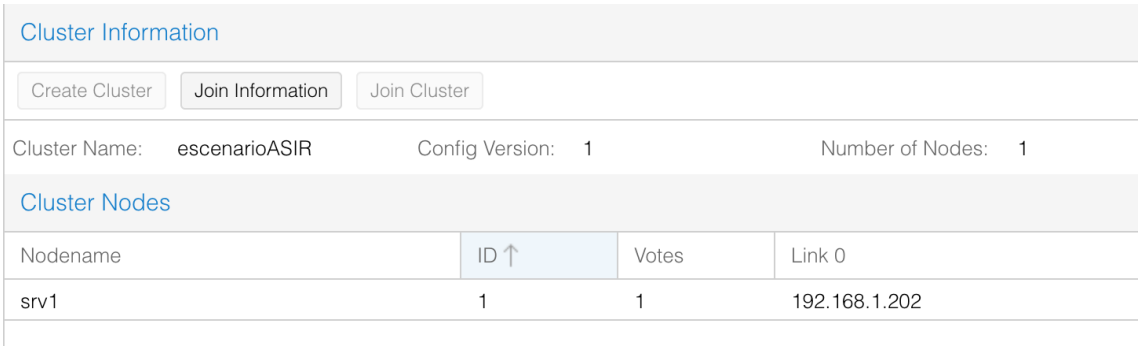
```
2: eth0@if15: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 qdisc noqueue state UP group default qlen 1000
    link/ether bc:24:11:47:9d:85 brd ff:ff:ff:ff:ff:ff link-netnsid 0
    inet 10.0.0.100/24 brd 10.0.0.255 scope global eth0
       valid_lft forever preferred_lft forever
    inet6 fe80::be24:11ff:fe47:9d85/64 scope link
       valid_lft forever preferred_lft forever
root@debian12-vnet3:~# ping 192.168.200.100
PING 192.168.200.100 (192.168.200.100) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.200.100: icmp_seq=1 ttl=63 time=0.078 ms
64 bytes from 192.168.200.100: icmp_seq=2 ttl=63 time=0.105 ms
64 bytes from 192.168.200.100: icmp_seq=3 ttl=63 time=0.106 ms
```

Ahora uniremos el nodo `srv2` al clúster para comprobar cómo se expande las zonas definidas anteriormente al resto de nodos que vayamos agregando. Para ello en primer lugar debemos crear un clúster desde `srv1`. Lo hacemos desde el menú Datacenter > Cluster > Create cluster:

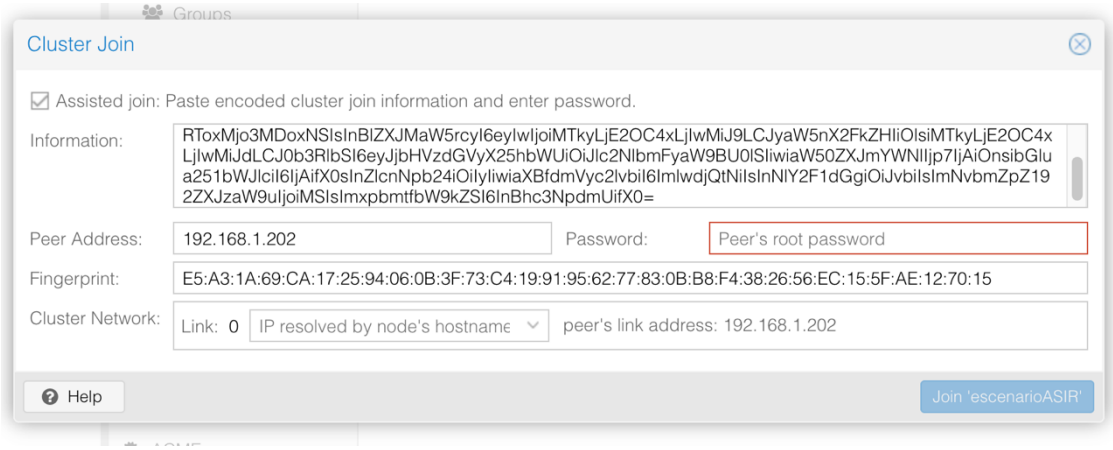




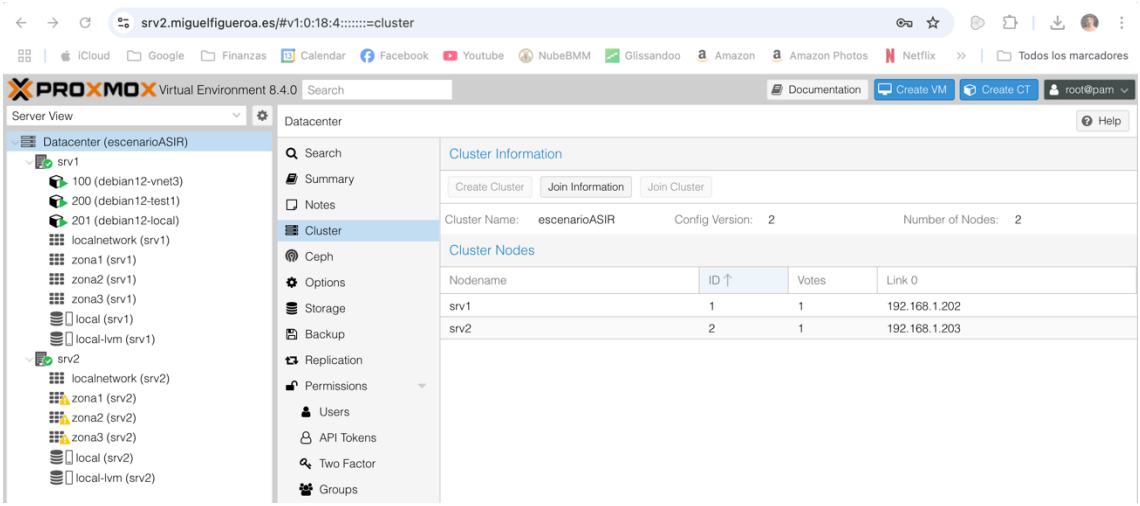
Y ya tenemos el clúster creado:



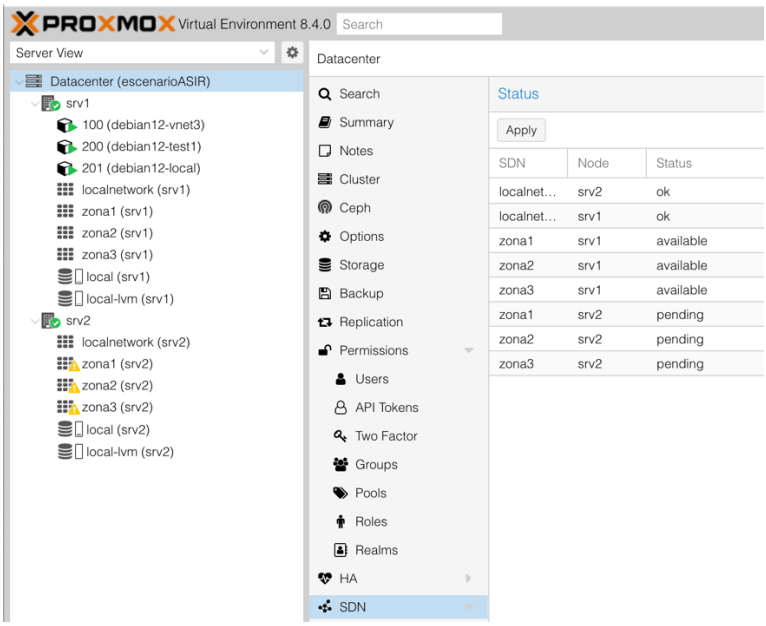
Ahora nos dirigimos a `srv2` para agregarlo al clúster creado. Para ello nos vamos al menú Datacenter > Cluster > Join cluster. Aquí deberemos pegar la información copiada anteriormente desde el botón "Join information" de `srv1`.



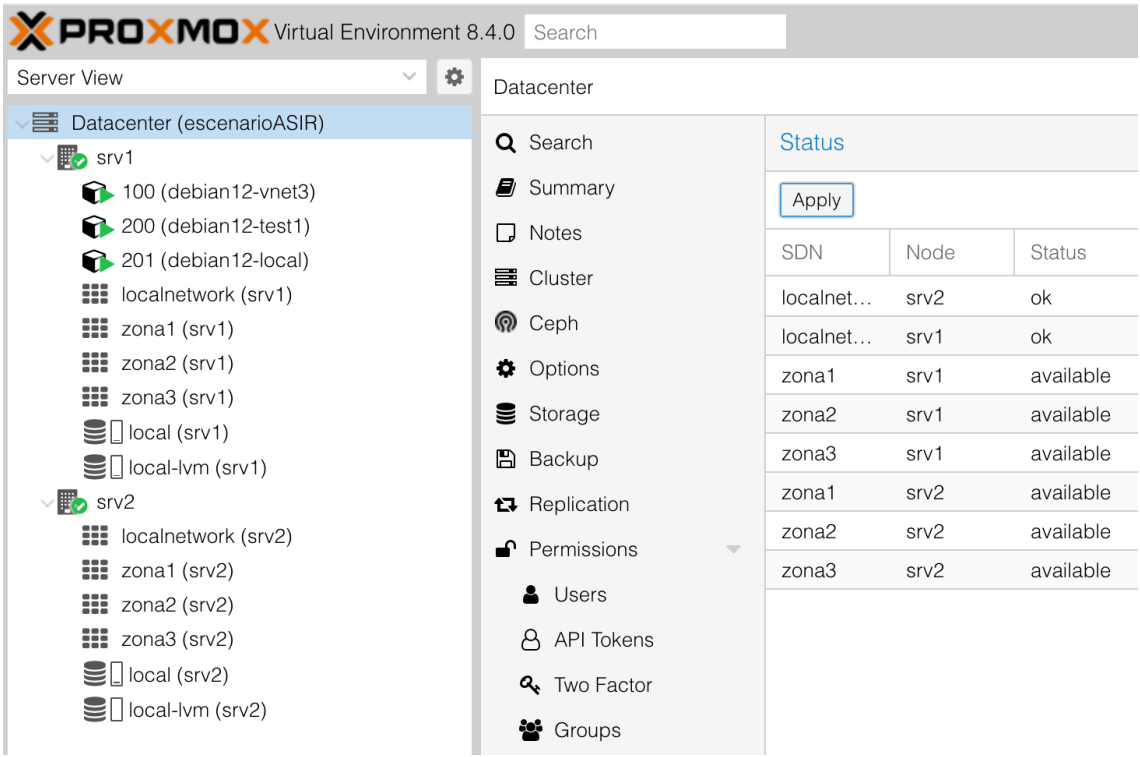
Deberemos introducir la contraseña del nodo y pulsar finalmente sobre el botón "Join". El proceso se realizará automáticamente y cuando finalice ya observaremos como desde el nodo `srv2` ya vemos también el resto de nodos que están dentro del cluster:



Ya podemos ver la distintas zonas que teníamos creadas previamente, pero aparecen con un símbolo de advertencia y es porque están pendientes de aplicar (cómo ya nos pasaba cuando creábamos una zona y no la aplicábamos):



Pulsamos el botón “Apply” y esto hará que recargue toda la configuración de las redes definidas por SDN en todos los nodos. Una vez termina ya comprobamos que están todas disponibles:



La extensión automática de zonas y VNets frente a la configuración manual de subnets responde a diferencias fundamentales en sus funciones dentro de la arquitectura de red:

- Las VNets operan como switches virtuales distribuidos dentro de una zona, proporcionando conectividad de capa 2 entre nodos. Su propagación automática permite migraciones transparentes de VMs y balanceo de carga.
- Las subnets son entidades de capa 3 vinculadas a VNets específicas, encargadas de gestión de direcciones IP (DHCP), configuración de gateways y reglas NAT/SNAT.

Algunos motivos de la no extensión automática de las subnets son:

- Especificidad de configuración: Cada subnet requiere ajustes particulares (rangos IP, reglas de firewall, integración con DNS) que varían según el nodo y su rol en la red.

- Prevención de conflictos: La replicación automática podría generar duplicados de rangos IP en diferentes nodos, causando colisiones.
- Arquitectura descentralizada: Las subnets se gestionan localmente en cada nodo a través de `dnsmasq`, requiriendo sincronización explícita.

5. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS

La implementación de SDN en Proxmox ha supuesto un avance significativo en la gestión y flexibilidad de la infraestructura de red virtualizada. Gracias a la integración de tecnologías como Open vSwitch y la centralización del control de red, el entorno ahora permite crear redes privadas aisladas, redes superpuestas entre múltiples clústeres y escenarios multiusuario, lo que facilita la segmentación lógica y la seguridad de los recursos virtuales. La virtualización de red posibilita una administración dinámica y programable, permitiendo adaptar la topología a las necesidades cambiantes del proyecto y optimizar el uso de recursos de red.

Durante el desarrollo del proyecto se han validado casos prácticos como la creación de redes virtuales aisladas para diferentes grupos de máquinas virtuales, pruebas de conectividad y aislamiento, la asignación automática de IPs mediante DHCP integrado y la escalabilidad al añadir nuevas redes o nodos al entorno SDN. Estas funcionalidades han demostrado ser eficaces tanto en escenarios de pequeña escala como en despliegues más complejos, manteniendo un rendimiento elevado y una baja latencia.

Sin embargo, también se han identificado áreas de mejora. Por ejemplo, la gestión de subnets requiere una configuración manual y cuidadosa para evitar conflictos de direccionamiento y garantizar la correcta integración de nuevos nodos, lo que añade un nivel de complejidad operativa. Además, la extensión de ciertas configuraciones de red, como las subnets, no es automática, lo que obliga a definir procesos claros para su despliegue y sincronización en todos los nodos del clúster.

6. DIFICULTADES

Durante el desarrollo e implementación del proyecto de redes definidas por software (SDN) en Proxmox, se han identificado diversas dificultades que han condicionado tanto el avance como la calidad de los resultados obtenidos.

Una de las principales barreras ha sido la escasez de documentación oficial y de calidad sobre SDN en Proxmox. Aunque existen manuales básicos y algunos apartados en la documentación oficial, la información suele ser limitada, en inglés y, en muchos casos, incompleta o en desarrollo. Esto nos obliga a recurrir a foros, vídeos de Youtube, hilos de discusión y experiencias de la comunidad para resolver dudas o problemas específicos, lo que puede resultar ineficiente y poco fiable. Además, la mayoría de los ejemplos prácticos disponibles se centran en escenarios muy básicos, sin abordar casos más complejos o situaciones reales de despliegue en entornos empresariales o multiusuario.

Otra dificultad recurrente es la falta de casos prácticos detallados. La documentación y los recursos existentes suelen limitarse a la explicación de conceptos teóricos o a la configuración inicial, sin profundizar en ejemplos de integración con servicios avanzados, resolución de incidencias, migraciones entre nodos o automatización de tareas. Esta ausencia de guías paso a paso y de soluciones a problemas habituales dificulta la curva de aprendizaje y aumenta la probabilidad de cometer errores de configuración, especialmente en escenarios donde se requiere alta disponibilidad o integración con otras tecnologías.

7. BIBLIOGRAFÍA

- https://base.miguelfigueroa.es/pve-docs/index.html
- https://doc-proxmox.datosporlasnubes.com/books/redes-en-proxmox-ii/page/41-que-son-las-sdn
- https://tecnocratica.net/wikicratica/books/proxmox-ve
- https://www.youtube.com/watch?v=vRniNRKxhWE
- https://mattglass-it.com/software-defined-network-proxmox/