

**Optimización dinámica del rango de direcciones IP  
mediante el análisis del protocolo DHCP y un algoritmo  
adaptativo basado en software libre**

**Dynamic IP address range optimization using DHCP  
protocol analysis and an open-source software based  
adaptive algorithm**

Gerardo Padilla Lomelí<sup>1</sup>  
gerardo.lomeli@uaslp.mx

---

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de San Luis Potosí

## Resumen

Uno de los problemas del DHCP es la conectividad, ya que los dispositivos conectados pueden provocar saturación del rango de direcciones IP. El 60% de los dispositivos conectados a una red inalámbrica ocupan una IP durante todo el tiempo de arrendamiento sin ser utilizadas debido a su movilidad entre las redes disponibles. Por tanto, una configuración unificada en el tiempo de arrendamiento y el rango de direcciones IP en cada segmento de red resulta en un uso ineficiente de las IPs. En este trabajo, después de analizar el comportamiento de la conectividad y el desempeño del DHCP de la zona poniente de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se propone el desarrollo de un modelo de optimización dinámica del DHCP para la asignación de direcciones IP utilizando un algoritmo adaptativo implementado en software libre como solución al problema de saturación en esta Universidad. Los resultados muestran una mejora de la conectividad en redes inalámbricas en un 98% ajustando sus tiempos de arrendamiento y en un 100% gestionando adecuadamente la distribución del rango de direcciones IP en cada segmento de red. Este algoritmo adaptativo funciona como un agente intermedio que inspecciona el comportamiento y rendimiento de DHCP y busca automáticamente una solución inmediata a la saturación de direcciones IP en la subred.

**Palabras clave:** Desempeño, DHCP, internet, optimización, saturación, tiempo de arrendamiento.

## Abstract

One problem with DHCP is connectivity, where connected devices can cause saturation of the IP address range. 60% of the devices connected to a wireless network occupy an IP during the entire lease time without being used due to its mobility between the available networks. Therefore, a unified configuration in the lease time and the range of IP addresses in each network segment results in inefficient use of IPs. In this work, after analyzing the connectivity behavior and performance of DHCP of the west zone of the Universidad Autónoma de San Luis Potosí, we proposed the development of a dynamic optimization model of DHCP for the allocation of IP addresses using an adaptative algorithm implemented in free software as a solution to the saturation problem in this University. The results show an improvement of connectivity in wireless networks by 98% by adjusting their lease times and by 100% by adequately managing the distribution of the IP address range in each network segment. This adaptative algorithm functions as an intermediate agent that inspects the behavior and performance of DHCP and automatically searches for an immediate solution to the IP address saturation in the subnet.

**Index Terms:** DHCP, lease time, optimization, performance, saturation.

## 1. Introducción

Hoy en día, las tecnologías inalámbricas se han convertido en una solución para satisfacer las necesidades globales de internet dentro de las instituciones y para la sociedad en general, debido a su portabilidad y compatibilidad, permitiendo el acceso concurrente de grandes cantidades de usuarios. El estudio del comportamiento de las redes inalámbricas que operan en instituciones y centros públicos ha permitido identificar que la saturación de direcciones IP (*Internet Protocol*) es una de las causas que provocan que este servicio sea deficiente [1], Otras causas son el tiempo que una dirección IP está asignada a un dispositivo [2], la movilidad del usuario entre redes, así como el envío persistente de paquetes de datos generados por software malicioso en los dispositivos infectados presentes en la red [3]. Un *router* inalámbrico es una interfaz común utilizada en una red para proporcionar conectividad a internet y realizar la asignación automática de direcciones IP al cliente [4]. Sin embargo, no es capaz de proporcionar una dirección IP al cliente cuando su conjunto de direcciones IP se ha agotado.

El Protocolo de Configuración Dinámica de Host (DHCP) se utiliza para asignar automáticamente la dirección IP y la información de configuración relacionada con el cliente en las Redes de Área Local (LAN). Debido a su conveniencia, el DHCP es ampliamente adoptado en las redes LAN inalámbricas (WLAN) de las universidades y las empresas, donde las redes son de gran escala con muchos dispositivos inalámbricos conectados [5]. Sin embargo, el aumento constante de dispositivos, como computadoras, tabletas, teléfonos y relojes inteligentes en los últimos años, y su frecuente movilidad aumentan la demanda de direcciones IP en las WLAN [6]. Aunque la configuración del servidor DHCP sigue siendo la misma en las WLAN, el comportamiento dinámico de los usuarios de una red inalámbrica, como el patrón de tiempo de conexión y el patrón de movilidad espacio-tiempo, plantea grandes desafíos en el rendimiento del DHCP [5]. Por ejemplo, si el dispositivo de un usuario utiliza una dirección IP en un lugar durante un periodo de tiempo corto y se traslada a otro lugar, su dispositivo puede adquirir una nueva dirección IP, mientras que la dirección IP anterior sigue apartada por el tiempo de arrendamiento asignado. Como resultado, el dispositivo ocupa dos direcciones IP en diferentes subredes durante un cierto periodo de tiempo, provocando el desperdicio de la primera dirección IP asignada. Además, un usuario puede tener varios dispositivos inalámbricos conectados, agravando el desperdicio de direcciones IP [7].

Existen dos parámetros importantes en la configuración del servidor DHCP: el Tiempo de Vida o de arrendamiento de la dirección IP (TTL o *Lease Time*) y el Rango de direcciones IP (*IP pool*). El primero determina el tiempo en que un dispositivo puede utilizar una dirección IP y el segundo determina el número máximo de direcciones IP disponibles para los clientes DHCP [8]. Los estudios consultados han intentado mejorar el rendimiento de DHCP ajustando el tiempo de arrendamiento de IP según los sistemas operativos de los dispositivos móviles [6] o con los patrones de conexión de los usuarios [9]. Sin embargo, si se configura un rango bajo de direcciones IP, el número de direcciones IP no cubrirá la demanda de los usuarios y varios clientes DHCP no podrán obtener una dirección IP para acceder a Internet en horas pico o con mayor afluencia de usuarios. Mientras que, si se configura un tiempo de arrendamiento largo, las direcciones IP se desperdician porque no pueden ser reasignadas mientras no expire su tiempo de arrendamiento [9].

Para hacer frente a los retos causados por el comportamiento dinámico de los usuarios de las redes inalámbricas y la asignación de direcciones IP a sus dispositivos, la principal contribución de esta investigación es el desarrollo de un algoritmo adaptativo para la optimización dinámica del rango de direcciones IP del DHCP basado en software libre, mediante el análisis de rendimiento del DHCP como una solución al problema de la saturación presentada en las subredes gestionadas por los Puntos de Acceso (AP), permitiendo ahorrar direcciones IP y mejorar la utilización de las mismas.

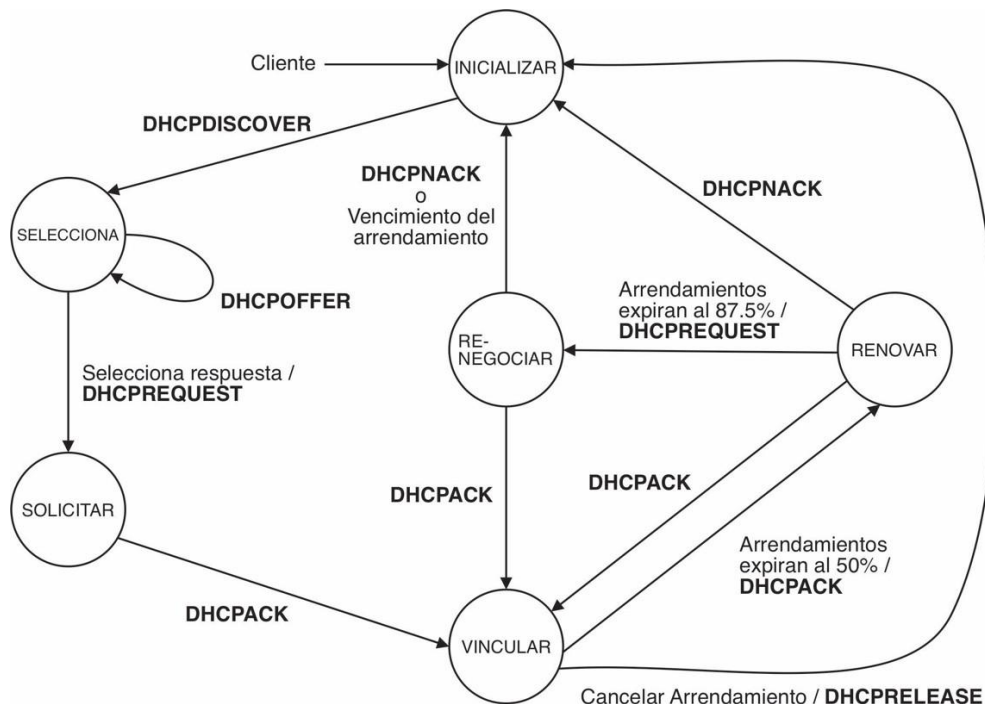
En este trabajo se propone un algoritmo con dos estrategias dinámicas de configuración: el ajuste del tiempo de arrendamiento de la dirección IP y el ajuste de la configuración del rango de direcciones IP. La primera consiste en establecer tiempos de arrendamiento en función del tiempo

de conexión de los usuarios para recuperar la dirección IP a tiempo y reducir los picos de uso de esta; la segunda es ajustar dinámicamente el rango de direcciones IP mediante el uso de subredes de reserva definidas para ampliar o restablecer el número de direcciones IP disponibles en DHCP, basándose en la correlación de movilidad del usuario.

## 2. El DHCP y su direccionamiento

El DHCP permite que un dispositivo obtenga una dirección IP dinámicamente sin que el administrador de la red tenga que configurar un perfil individual para ese cliente. Todo lo que se requiere es un rango definido de direcciones IP en un servidor DHCP [10]. Los dispositivos conectados se ponen en contacto con el servidor DHCP y solicitan una dirección IP. El servidor DHCP elige una dirección IP y la asigna a ese dispositivo.

El proceso se realiza cuando un cliente DHCP entra en un estado de inicialización, este envía mensajes de difusión DHCPDISCOVER, que son paquetes UDP (Protocolo de Datagramas de Usuario) con el número de puerto establecido que permite el envío de datagramas de forma rápida en redes IP sin establecer una conexión previa con el servidor. Una vez enviados los paquetes DHCPDISCOVER, el cliente pasa al estado de selección y recoge las respuestas DHCPPOFFER del servidor DHCP. El cliente selecciona la primera respuesta que recibe y negocia el tiempo de arrendamiento con el servidor DHCP enviando un paquete DHCPREQUEST. El servidor DHCP acusa de recibo de la solicitud del cliente con un paquete DHCPACK. El cliente puede ahora entrar en el estado vinculado y empezar a usar la dirección IP [11]. La Figura 1 resume los mensajes de una petición de DHCP, es decir, especifica un método para configurar dinámicamente los parámetros de red necesarios para que un sistema pueda comunicarse efectivamente. El sistema operativo de código abierto FreeBSD2 utiliza la implementación de DHCP proporcionada por el *Internet Software Consortium* (ISC), de tal forma que la información relativa a la configuración de DHCP se basa en la distribución proporcionada por el ISC [12].



**Figura 1.** Diagrama de estados del formato básico de un mensaje de solicitud de dirección IP del DHCP.

Cuando el cliente de DHCP se ejecuta, este comienza a enviar peticiones *broadcast* solicitando información de configuración. Por defecto, estas peticiones se realizan contra el puerto UDP 68, el cual provee un servicio poco fidedigno y datagramas que pueden duplicarse, descomponerse o perderse durante el envío. El servidor responde a través del puerto UDP 67, proporcionando al cliente una dirección IP junto con otros parámetros relevantes para el funcionamiento correcto del sistema en la red, como: la máscara de red, el router de salida por defecto y los servidores de DNS [13]. Toda esta información asignada es válida solo durante un determinado periodo de tiempo. De esta forma, las direcciones IP asignadas a clientes que ya no se encuentran conectados a la red pueden ser reutilizadas solamente al expirar el periodo de tiempo establecido.

La configuración del DHCP se compone de un conjunto de declaraciones que hacen referencia a clientes y subredes (/usr/local/etc/dhcpd.conf), por ejemplo:

```

subnet 10.103.16.0 netmask 255.255.255.0
{
    option routers 10.103.16.1;
    option domain-name-servers 140.234.17.26;
    default-lease-time 3600;
    range 10.103.16.11 10.103.16.254;
}

```

Donde se especifica la dirección de la subred asignada al router, el tiempo de vida o arrendamiento por defecto para las direcciones IP de la subred y el rango de direcciones IP disponibles para ser asignadas a los clientes. Para esta investigación, la Tabla 1 muestra un ejemplo de las subredes principales definidas en el archivo de configuración del DHCP, y la subred de reserva adyacente superior, indispensable para el ajuste del rango de direcciones IP de la subred. Las subredes de reserva son segmentos de red no asignados y disponibles para incrementar el tamaño de una subred principal cuando presente sobrecarga o saturación.

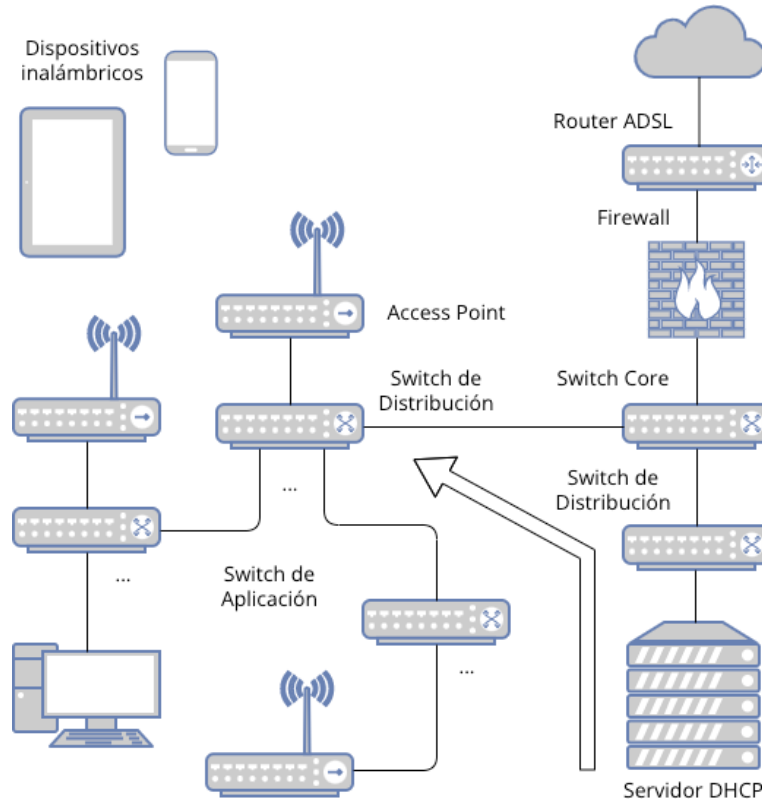
| Subred base    | Subred de reserva | Hosts | Nueva máscara  | Rango de direcciones IP      | Nvos. Hosts |
|----------------|-------------------|-------|----------------|------------------------------|-------------|
| 10.103.10.0/24 | 10.103.11.0       | 243   | 10.103.10.0/23 | 10.103.10.11 – 10.103.11.254 | 497         |
| 10.103.16.0/24 | 10.103.17.0       | 254   | 10.103.16.0/23 | 10.103.16.1 – 10.103.17.254  | 508         |
| 10.103.23.0/24 | ---               | 254   | ---            | 10.103.23.1 – 10.203.23.254  | ---         |
| 10.103.50.0/24 | 10.103.51.0       | 244   | 10.103.50.0/23 | 10.103.50.10 – 10.103.51.254 | 498         |
| ...            |                   |       |                |                              |             |

**Tabla 1.** Direccionamiento de las subredes principales y la definición de las subredes adyacentes superiores de reserva para el incremento de del pool de direcciones IP.

### 3. La metodología

El análisis y evaluación del rendimiento del DHCP se basan en conjuntos de datos recogidos en la red inalámbrica del campus a gran escala, es decir, la Zona Poniente (ZP) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), la cual cuenta con más de 33,000 usuarios individuales en sus diferentes entidades académicas y administrativas [14]. Como se muestra en la Figura 2, la UASLP está gestionada por un servidor DHCP. El servidor controla una gran cantidad de Puntos de Acceso (AP) en los diferentes edificios del campus y estos AP comparten el conjunto de direcciones IP asignadas por el servidor DHCP. Cuando un dispositivo se conecta a la red inalámbrica, primero inicia una petición de conexión al servidor DHCP para obtener una dirección IP. Después, necesita comunicarse con el servidor de autenticación para validar la identidad del usuario antes de acceder a Internet. Para este trabajo, se utilizaron los datos recogidos para el día

donde se presentó la máxima afluencia de usuarios requerida para el análisis de las mediciones y la evaluación de la estrategia de arrendamiento [6]. En esta sección, primero se presentan los conjuntos de datos recopilados, y a continuación se describe la metodología utilizada para gestionar adecuadamente los tiempos de arrendamiento y la distribución del rango de direcciones IP.



**Figura 2.** Arquitectura de la red y servidor DHCP de la UASLP.

### 3.1. Conjuntos de datos

En este trabajo se utilizaron principalmente dos tipos de datos: los registros de peticiones del DHCP (logs) y los registros de arrendamientos IP que han sido asignados [15].

**Registros DHCP.** Estos registros son generados por el servidor DHCP y registran las acciones del servidor en respuesta a las peticiones de los clientes. Hay más de 1,500,000 entradas en los registros en un día con alta actividad en ZP. Cada entrada registra la hora de un mensaje, la dirección IP y la dirección MAC (Media Access Control, por sus siglas en inglés) de un cliente. Además, también incluye algunos atributos importantes como la descripción del tipo de mensaje DHCP descritos en la Figura 1, el nombre del host de un cliente DHCP, los usuarios pueden personalizar cadenas significativas como los nombres de sus dispositivos y suele contener algunas palabras que pueden utilizarse para identificar el tipo de dispositivo, y la clase de proveedor que proporciona un valor identificador con algunas pistas del sistema operativo del dispositivo [16], por ejemplo:

```

Apr 3 13:58:46 dhcp: DHCPREQUEST for 10.116.65.10
from ac:84:c6:ed:2c:bd (TL-WR840) via bge0
Apr 3 13:58:46 dhcp: DHCPACK on 10.116.65.173 to ac:
84:c6:ed:2c:bd (TL-WR840N) via bge0
Apr 3 13:58:46 dhcp: DHCPREQUEST for 10.116.65.232
from d8:9e:f3:43:38:88 (F1PC6) via bge0
Apr 3 13:58:46 dhcp: DHCPACK on 10.116.65.232 to d8:
9e:f3:43:38:88 (F1PC6) via bge0
Apr 3 23:58:54 dhcp: DHCPREQUEST for 10.116.67.212
from 5c:f9:dd:6c:5b:64 (ulises-Latitude)|
Apr 3 23:58:54 dhcp: DHCPACK on 10.116.67.212 to 5c:
f9:dd:6c:5b:64 (ulises-Latitude) via bge0

```

**Registros de arrendamiento IP.** El servidor DHCP mantiene una base de datos persistente de arrendamientos IP que han sido asignados. Esta base de datos es un archivo ASCII de formato libre que contiene una serie de declaraciones de arrendamiento IP. Cada vez que un contrato de arrendamiento es adquirido, renovado o liberado, su nuevo valor se registra al final del archivo, con la siguiente estructura:

```

lease 10.116.65.153
{
starts epoch 1666184; # Wed Oct 19 08:09:17 2022
ends epoch 1666188; # Wed Oct 19 09:09:17 2022
tstp epoch 1666188; # Wed Oct 19 09:09:17 2022
cltt epoch 1666185; # Wed Oct 19 08:10:03 2022
binding state active;
hardware ethernet b0:73:5d:b3:7d:a5;
uid "\001\260s]\263}\245";
set vendor-class-identifier = "HUAWEI:android";
}

```

Las descripciones de arrendamiento se almacenan en un formato que es validado por el mismo analizador descendente recursivo utilizado para leer los archivos de configuración del DHCP. Estos archivos pueden contener declaraciones de arrendamiento, declaraciones de grupo y subgrupo, declaraciones de host y declaraciones de estado de conmutación por error [10]. Si bien los formatos del archivo de arrendamiento para DHCPv4 y DHCPv6 son diferentes, estos comparten muchas declaraciones y estructuras comunes.

Cada declaración de arrendamiento incluye solo una dirección IP que ha sido asignada al cliente [16]. La hora de inicio y finalización de un contrato de arrendamiento se registran mediante las sentencias **starts** y **ends**. La sentencia **tstp** está presente si se está utilizando el protocolo de conmutación por error, e indica a qué hora se le ha comunicado al cliente el vencimiento del contrato de arrendamiento. La sentencia **cltt** es la hora de la última transacción del cliente. La sentencia **hardware** registra la dirección MAC de la interfaz de red en la que se utilizará la dirección IP asignada. La sentencia **uid** registra el identificador de cliente si este ha sido enviado por el mismo. La sentencia **binding state** declara el estado de vinculación del contrato de arrendamiento. Cuando el servidor DHCP no está configurado para utilizar el protocolo de conmutación por error, el estado de vinculación de un contrato de arrendamiento de una dirección IP puede ser activo, libre o abandonado; permitiendo identificar a los dispositivos presentes en la red.

## 3.2. Asignación dinámica de direcciones IP

La metodología de investigación se expone en tres aspectos, es decir, el algoritmo de recolección de datos para el cálculo del tiempo de monitoreo, el algoritmo de monitoreo y ajustes en la configuración de subredes administradas por el DHCP, y las partes del sistema en línea de monitoreo propuesto

### 3.2.1. Fase 1: Tiempo de monitoreo

Conociendo el número de dispositivos conectados en cierto periodo de tiempo, así como los segmentos con mayor tasa de saturación, se pueden definir criterios para la toma de decisiones, el tiempo que se empleará para monitorear el estado actual de cada segmento de red. Para el cálculo del tiempo de monitoreo de las subredes se consideran las variables que influyen en la dinámica de peticiones de conexión, así como la asignación o denegación de direcciones IP en un lapso determinado, tales como: el número de segmentos saturados, el rango de direcciones IP de la subred, el número de peticiones recibidas y el tiempo que tarda en saturarse cada segmento de red. Entre más tráfico de conectividad se registra en el archivo de registros del DHCP, se asume que existen varios segmentos de red saturados, dando como resultado un tiempo de monitoreo corto que permitirá realizar los ajustes necesarios a la configuración de la subred; si el tráfico de conectividad es bajo, el tiempo de monitoreo deberá ser más largo, ahorrando costos de cómputo.

### 3.2.2. Fase 2: Algoritmo adaptativo de monitoreo y configuración dinámica de direcciones IP

Ya que existe un comportamiento de movilidad de los usuarios de Wifi, se propone un algoritmo inteligente que combina dos estrategias de configuración en el servidor DHCP: la configuración del tiempo de arrendamiento IP adaptable y la configuración del rango de direcciones IP. La primera estrategia consiste en reducir el tiempo de arrendamiento IP en las subredes con mayor cambio en su patrón de movilidad del usuario y de esta forma reducir el pico de uso de direcciones IP en zonas con mayor afluencia. La segunda estrategia consiste en configurar dinámicamente la reserva de direcciones IP en cada segmento de red, basándose en la correlación espacio-tiempo de la movilidad del usuario.

El algoritmo adaptativo comprueba la asignación de direcciones IP del rango de direcciones disponibles y su tiempo de arrendamiento. Este método de equilibrio de carga aplica la modificación sin cambiar el comportamiento original del protocolo. Análogamente, es un agente intermedio que se encarga de inspeccionar el comportamiento y rendimiento de DHCP y buscar la solución inmediata a la saturación de direcciones IP en la subred.

La Figura 3 muestra el flujograma del algoritmo adaptativo propuesto para optimizar la asignación dinámica de direcciones IP de DHCP. El proceso de monitoreo comienza al reiniciar el servicio de DHCP para obtener una carga de asignaciones con la configuración inicial del servidor de DHCP y el tiempo de monitoreo inicial ( $T_m$ ). Se definen dos conjuntos de datos: el primero  $*a$  para el control de persistencia en la configuración del segmento, y el segundo  $*e$  para la generación de estadísticas de rendimiento del DHCP.

El algoritmo propuesto verifica cada tiempo  $T_m$  el estado actual de las subredes en el DHCP, siendo estas de clase C con máscara de subred de 24 bits y de clase B (23 bits) según la segmentación de reserva aplicada, donde para una subred el rango de direcciones IP disponibles puede estar entre la dirección 1 y la 254, debido a que toda subred debe tener su propia dirección de red y su propia dirección de *broadcast*. Para cada subred se obtiene el rango de direcciones IP disponibles ( $n$ ), el tiempo de arrendamiento IP (TTL) y la subred de reserva. Mediante un subproceso se realiza la búsqueda de los arrendamientos IP activos asignados ( $x$ ).

Teniendo la información de la subred y sus arrendamientos IP activos, el algoritmo identifica si el segmento presenta situación de saturación y se validan los posibles casos de ajuste, que se describen a continuación:



1. Si el total de arrendamientos activos es igual al total de direcciones IP disponibles, se requiere ajuste por saturación; si no, se lleva un conteo de las validaciones donde la subred mantiene el último ajuste en su configuración. Cuando la subred supera el máximo de validaciones definidas ( $N$ ) sin cambios en su última configuración, indica que no se ha presentado saturación; por tanto, se restablece a su configuración inicial.
2. Si el tiempo de arrendamiento IP actual puede ser reducido en un tiempo definido ( $D$ ), el cual puede ser expresado como sigue:

$$(T_a \mid 0 < T_a \leq T_i, T_a \in T_i - mD, n \in N)$$

donde  $T_a$  es el tiempo de arrendamiento actual en el segmento, el cual es estrictamente mayor que 0 y menor al tiempo de arrendamiento inicial  $T_i$ , siendo  $T_a$  parte del conjunto de los posibles elementos obtenidos por los valores enteros de  $m$ , tal que  $m$  es el número de veces que puede reducir  $T_a$ , en intervalos de  $D$  segundos.

Si consideramos un tiempo de reducción  $D=900$  segundos y un tiempo de arrendamiento inicial  $T_i=3600$  segundos, el número de veces que se puede reducir el tiempo de arrendamiento IP de la subred inicial es igual a 3. Este planteamiento proporciona una base para comprender cómo el tiempo de arrendamiento de una dirección IP en un segmento de red puede ajustarse dinámicamente en función de ciertos parámetros predefinidos. Para este caso, los tiempos de arrendamiento para las  $m$  reducciones están dados por:

|         |   |                         |
|---------|---|-------------------------|
|         | $T_a = T_i - mD$                                      |                         |
| $m=1$ : | $T_a = 3600 \text{ seg} - 1 (900) = 2700 \text{ seg}$ | 1a. reducción           |
| $m=2$ : | $T_a = 3600 \text{ seg} - 2 (900) = 1800 \text{ seg}$ | 2a. reducción           |
| $m=3$ : | $T_a = 3600 \text{ seg} - 3 (900) = 900 \text{ seg}$  | 3a. reducción           |
| $m=4$ : | $T_a = 3600 \text{ seg} - 4 (900) = 0 \text{ seg}$    | 4a. reducción no válida |

Este modelo de asignación de direcciones IP es capaz de calcular el uso de direcciones IP con diferentes configuraciones de tiempo de arrendamiento, al considerar el tiempo de conexión del usuario y las áreas con mayor demanda de IP. Como resultado, es posible elegir la configuración del tiempo de arrendamiento de las direcciones IP en función de la cantidad de usuarios conectados y las limitaciones del servidor DHCP. Esta capacidad facilita la liberación de direcciones asignadas a usuarios que ya no están presentes en la red, lo que evita la ocupación innecesaria de direcciones IP, permitiendo que estas puedan ser reclamadas por otros clientes de la red.

La representación en pseudocódigo para la reducción del tiempo de arrendamiento IP de una subred es la siguiente:

**Entrada:** ipRed, m, D

**Salida:** n\_TTL

```
a_TTL ← 0                                tiempo de arrendamiento actual
n_TTL ← 0                                nuevo tiempo de arrendamiento
linea ← cadena[N]                         línea de texto
archivo ← abrir_archivo ('dhcpd.conf')    abrir en modo lectura/escritura
partes ← array[N]                         separar palabras de la línea

si archivo ≠ NULL entonces                si se pudo abrir el archivo
  linea ← leer_linea (archivo)

  mientras linea ≠ EOF hacer              mientras no es fin del archivo
    si "subnet" ∧ ipRed ∧ "{" ⊆ linea entonces
      linea ← leer_linea (archivo)

      mientras "}" ∉ linea hacer
        si "default-lease-time" ⊆ linea entonces
          partes ← separar_espacios (linea)
          a_TTL ← entero (partes [2])
          n_TTL ← a_TTL - m * D
          si n_TTL > 0 entonces
            escribir_linea ("default-lease-time", n_TTL, ";", archivo)
            romper mientras
          fin si
        fin si
      linea ← leer_linea (archivo)
    fin mientras
  fin si
  cerrar_archivo (archivo)
fin si
```

3. Si el tiempo de arrendamiento de la subred no se puede reducir más y se tiene definido un segmento adyacente de reserva para la subred, el objetivo es sumar el rango de direcciones IP disponibles del segmento de reserva a la subred y de esta forma ampliar el rango de direcciones disponibles, para esto se debe considerar lo siguiente:

- a) El subneteo permite dividir una red IP física en subredes lógicas más pequeñas. Cada una de estas trabaja a nivel de envío y recepción de paquetes como una red individual, aunque todas pertenezcan a la misma red física y al mismo dominio.
- b) Las direcciones IP están compuestas por 32 bits divididos en 4 octetos de 8 bits cada uno. A su vez, un bit o una secuencia de bits determinan la clase a la que pertenece la dirección IP. Cada clase de una dirección de red determina una máscara por defecto, un rango IP, cantidad de redes y de *hosts* por red.
- c) La máscara de subred se divide en dos partes: la primera es la porción de red que indica la parte de la dirección IP que va a ser común a todos los *hosts* de la subred, y la segunda es la porción de host que indica qué parte de la dirección IP se usa para asignar direcciones de *host*.

Cuando la declaración de la subred en el archivo de configuración contiene el parámetro "#reserve-subnet" con un valor de 1, indica que la subred actual puede hacer uso de la subred de reserva adyacente superior, reservada para ampliar su rango de direcciones IP disponibles.

Por ejemplo, dada la siguiente dirección de subred clase C: 10.103.16.0/24 con un rango de 243 direcciones IP disponibles, su máscara de subred se define como 255.255.255.0, donde los tres primeros octetos identifican la porción de red y el cuarto octeto identifica la porción de *hosts*, y una subred adyacente de reserva clase C: 10.103.17.0/24 con un rango de 253 direcciones IP disponibles de 10.103.17.2 a 10.103.17.254, al incrementar el rango de direcciones es necesario hacer uso del tercer octeto para la porción de *hosts* dando como resultado una red de clase B de 23 bits con la máscara de subred 255.255.254.0. La nueva configuración de la subred con un rango de 496 (243 + 253) direcciones IP disponibles se establece como:

```

subnet 10.103.16.0 netmask 255.255.254.0
{
  option routers 10.103.16.1;
  option domain-name-servers 140.234.17.26;
  default-lease-time 3600;
  range 10.103.16.11 10.103.17.254;
  #reserve-subnet 1
}

```

La representación en pseudocódigo para calcular la nueva máscara de subred y obtener la última dirección IP necesaria para ampliar el rango de direcciones IP de la subred es la siguiente:

```

Entrada: ipRed
Salida: n_TTL
r_subnet ← 0
rango ← array[2]
línea ← cadena[N]
archivo ← abrir_archivo("dhcpd.conf")
partes ← array[N]

si archivo ≠ NULL entonces
  línea ← leer_línea(archivo)

  mientras línea ≠ EOF hacer
    si "subnet" ^ ipRed ^ "{" ⊆ línea entonces
      línea ← leer_línea(archivo)

      mientras "}" ∉ línea hacer
        si "range" ⊆ línea entonces
          partes ← separar_espacios(línea)
          octetos1 ← cadena_a_vector(partes[2])
        fin si

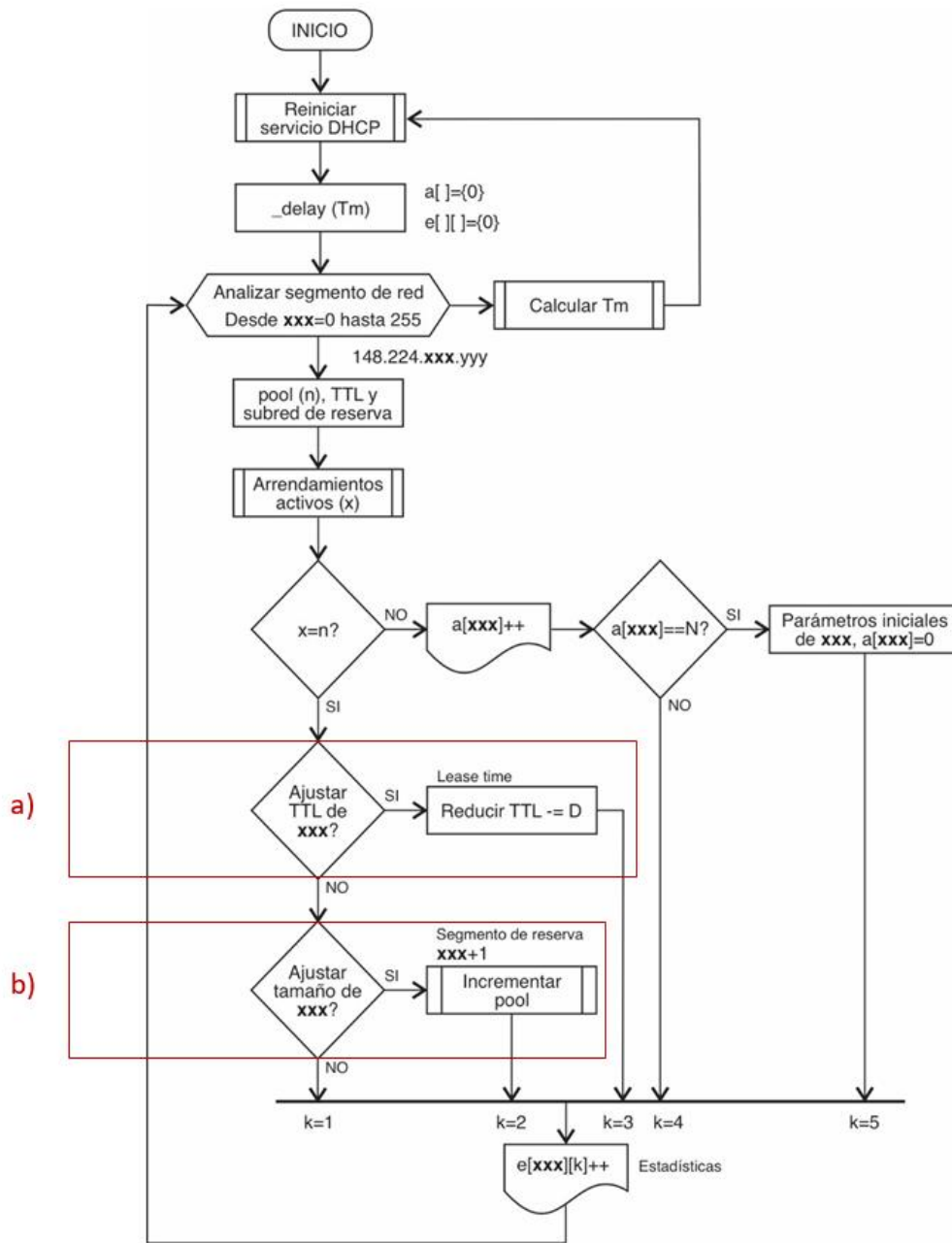
        si "#reserve-subnet" ^ "1;" ⊆ línea entonces
          octetos2 ← cadena_a_vector(ipRed)

          si octetos1[3] = octetos2[3] entonces
            rango ← nueva_máscara(ipRed, 23)
            escribir_línea("range ", rango[0], " ", rango[1], ";\n", archivo)
            romper_mientras
          fin si
        fin si

      línea ← leer_línea(archivo)
    fin mientras
  fin si
  cerrar_archivo(archivo)
fin si

```

*parámetro reserve-subnet  
nuevo rango de direcciones IP  
línea de texto  
abrir en modo lectura/escritura  
separar palabras de la línea  
si se pudo abrir el archivo  
mientras no es fin del archivo*



**Figura 3.** Flujograma del algoritmo adaptativo propuesto para el monitoreo de las subredes y la resolución al problema de saturación en los segmentos de red, donde a) Reducción del tiempo de arrendamiento en un factor  $D$ . b) Incremento del pool de direcciones utilizando una subred de reserva adyacente.

Todos los posibles resultados obtenidos por el algoritmo de optimización son registrados para el cálculo de desempeño del servidor de DHCP, donde el valor de  $k$  representa el estado obtenido a la solución propuesta por el algoritmo, como: 1. Subredes con saturación sin solución. 2. Subredes con segmentos de reserva y ajuste en su rango de direcciones. 3. Subredes con TTL reducido. 4. Subredes sin cambios en su configuración, y 5. Subredes restablecidas a su configuración inicial.

Estos registros detallados del estado resultante proporcionan una visión integral de cómo la aplicación del algoritmo afecta la operatividad y la eficiencia del servidor DHCP, permitiendo una evaluación exhaustiva de su desempeño y una comprensión profunda de los impactos generados por las soluciones propuestas.

Este algoritmo de optimización propuesto se desarrolló mediante scripts en Lenguaje PHP, Javascript y comandos internos y externos del sistema operativo UNIX que permiten una forma flexible de trabajar con la configuración del DHCP desde la interfaz de monitoreo.

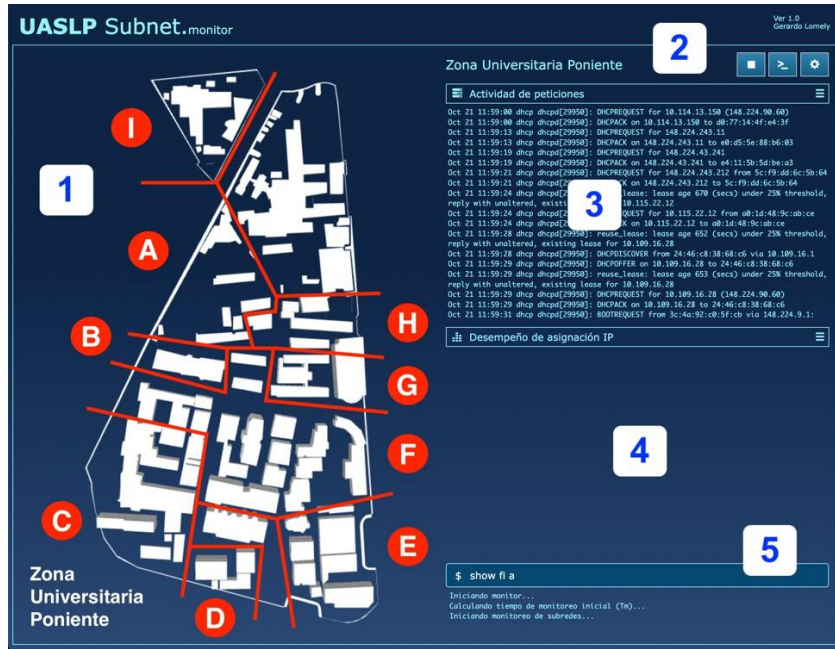
### 3.2.3. Fase 3: Sistema en línea de monitoreo del DHCP

Se desarrolló una herramienta de monitoreo para web llamada **Subnet.monitor** (SM) que supervisa de forma activa el rendimiento del DHCP de las redes inalámbricas de ZP. SM automatiza el proceso de detección de problemas relacionados con la asignación dinámica de direcciones IP en las subredes, permitiendo alertar adecuadamente a los administradores de red y aplicar dinámicamente una posible solución. SM monitorea los registros de mensajes generados en el servidor DHCP (logs) y sus registros de arrendamiento IP para generar informes en tiempo real sobre el estado actual del espacio de direcciones de una subred y el desempeño del servidor DHCP, identificando aquellas subredes con problemas de saturación en su rango de direcciones IP y realizar el ajuste necesario en el tiempo de arrendamiento o el ajuste en el rango de direcciones disponibles en la subred.

Una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) es una herramienta versátil que muestra y configura los parámetros del algoritmo inteligente y su optimización en tiempo real. La Figura 4 muestra la GUI, la cual está organizada en cinco secciones principales que se describen a continuación:

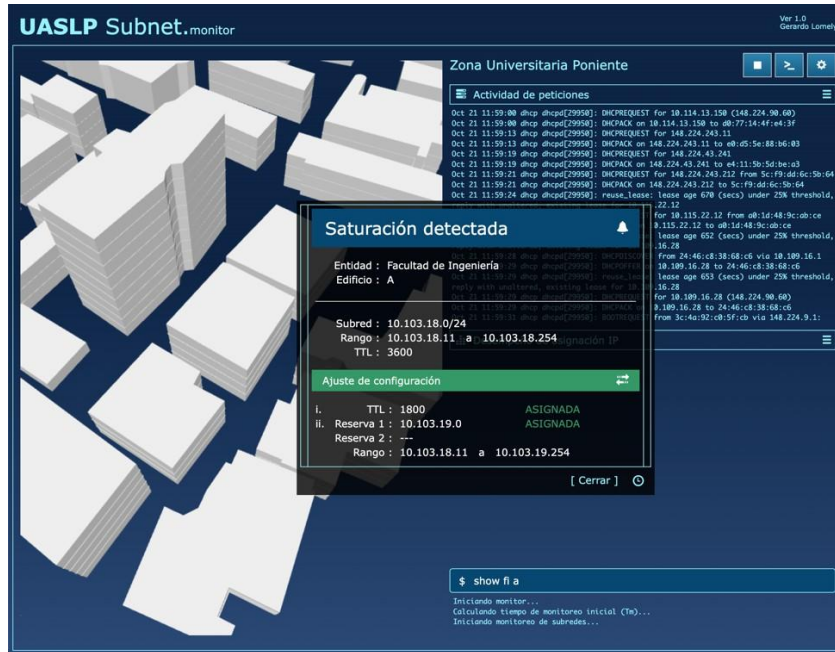
1. Modelo 3D del campus de ZP de la UASLP, identifica de forma visual la ubicación geográfica y el edificio donde se encuentra el AP con problemas de saturación. Para este trabajo, se analizó la información generada por el servidor DHCP en las diferentes entidades académicas del campus.
2. Menú de opciones del sistema para la selección del campus a monitorear, iniciar/detener el sistema de monitoreo, mostrar/ocultar línea de comandos (consola de entrada), y configuración de subredes y propiedades del DHCP.
3. Consola de salida para la visualización en tiempo real de los mensajes generados por las peticiones DHCP (logs).
4. Gráfica de comportamiento y rendimiento del servidor de DHCP.
5. Consola de entrada para la ejecución de comandos de control, como: **show** <entidad> <edificio> ubica el modelo 3D en un punto campus y muestra el estado actual de la subred, **reboot** restablece los parámetros de las subredes a su configuración inicial, **ttl** <subred> <valor> ajusta manualmente el tiempo de arrendamiento IP de una subred, y **pool** <{add | del}> <subred> <subnet\_reserva> agrega o quita manualmente la subred de reserva definida en la configuración. Si se tiene definida una subred de reserva para la subred especificada, se incrementa el rango de direcciones disponibles en DHCP, en caso contrario regresa error.

Además de utilizar SM para monitorear el uso de direcciones IP y rendimiento del DHCP, la funcionalidad principal de SM puede ampliarse para proporcionar soluciones temporales de forma automática o manual cuando surge un problema crítico de saturación, ajustando los tiempos de arrendamiento IP para evitar el agotamiento del conjunto de direcciones IP disponibles, o ajustar el conjunto de direcciones, toda vez que no se tengan direcciones IP disponibles para asignar al cliente.



**Figura 4.** Interfaz gráfica de usuario del sistema en línea de monitoreo de subredes para el campus de la zona poniente de la UASLP.

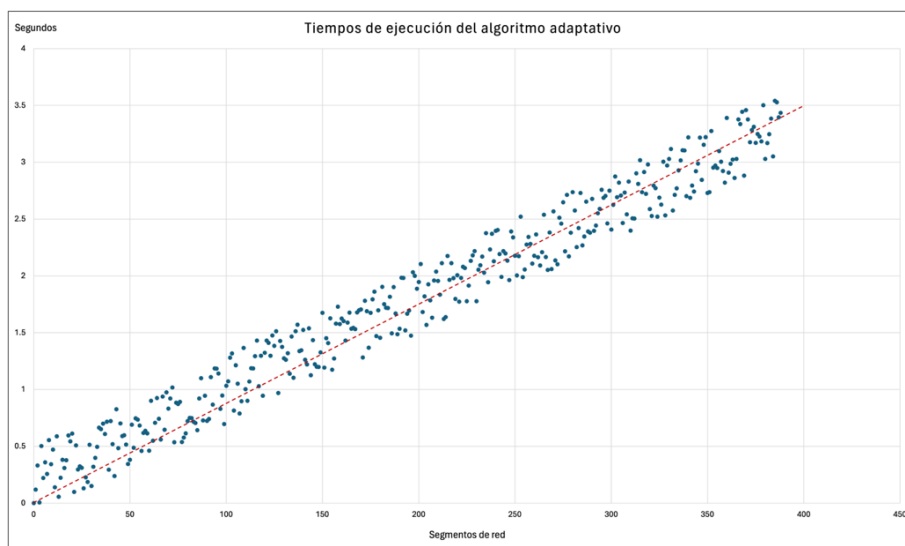
La Figura 5 muestra un ejemplo del funcionamiento del sistema de monitoreo. SM revisa cada cierto Tm el estado actual de las subredes definidas en DHCP, verifica el número de arrendamientos asignados y determina si un segmento de red requiere un ajuste en su configuración. La nueva configuración es aplicada toda vez que se hayan revisado la totalidad de subredes configuradas en el DHCP.



**Figura 5.** Alerta de detección y corrección de saturación en una subred de DHCP.

#### 4. Resultados y discusión

Para conocer el rendimiento del algoritmo adaptativo en diferentes entornos de red, se realizaron diversos experimentos utilizando un procesador con una velocidad de procesamiento de 0.2 ns por instrucción para calcular los tiempos de ejecución del algoritmo adaptativo propuesto. Estos experimentos consideraron obtener los tiempos de ejecución de un solo segmento de red hasta el número total de subredes de la ZUP, que actualmente asciende a 388 segmentos de red. La metodología de los experimentos incluyó la simulación del monitoreo de las subredes y la generación aleatoria de situaciones de saturación. Los tiempos obtenidos se presentan en la Figura 6, mostrando un comportamiento lineal del algoritmo en el tiempo de ejecución en relación con el tamaño de la entrada.

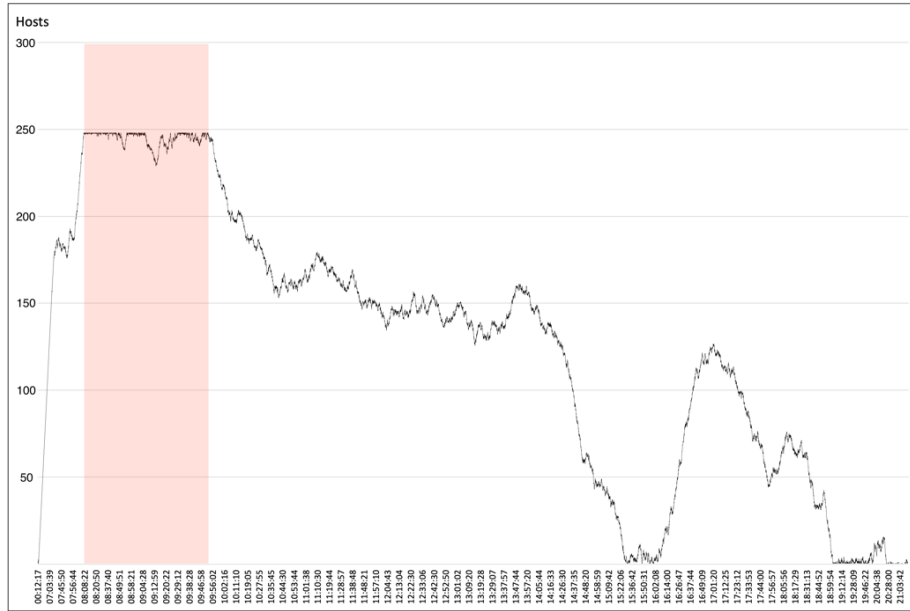


**Figura 6.** Tiempos de ejecución obtenidos al aplicar el algoritmo adaptativo para monitorear y resolver problemas de saturación desde una subred hasta 388 subredes.

Para cada uno de los segmentos analizados, se obtuvo un tiempo de ejecución que se ve afectado por diversos factores, el tiempo que la CPU del servidor dedica específicamente a ejecutar el algoritmo adaptativo, este período de tiempo constituye una parte crucial de la medición, refleja directamente la eficiencia y el rendimiento del algoritmo en el entorno de ejecución proporcionado.

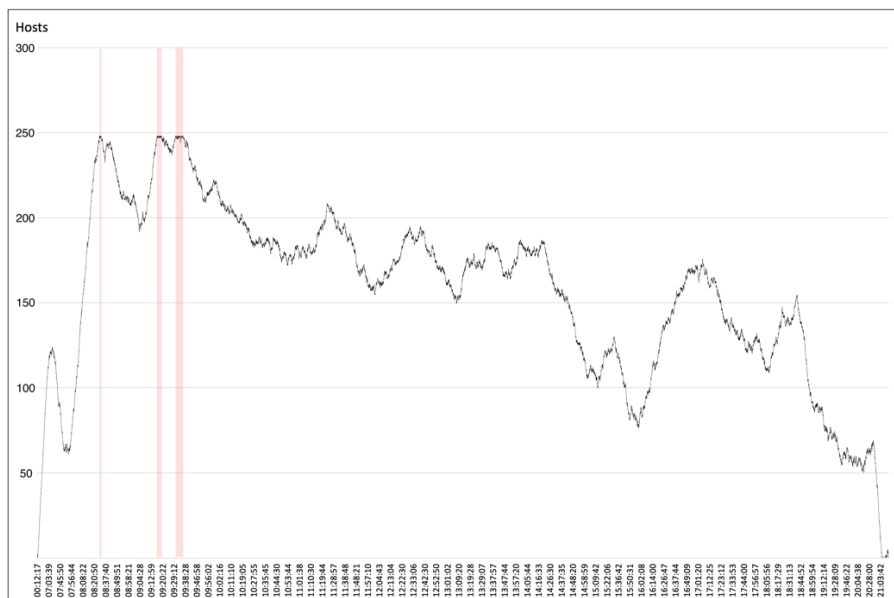
Para verificar el funcionamiento correcto del algoritmo adaptativo propuesto, se realizaron dos simulaciones utilizando los datos de peticiones de conectividad almacenados en los registros del DHCP (logs) como datos de entrada, permitiendo que el algoritmo inteligente modifique y ajuste los parámetros de configuración de las subredes analizadas.

La primera simulación consistió en comprobar la mejora de la disponibilidad de una de las subredes con mayor afluencia de usuarios, es decir, el número de clientes conectados en un día ordinario, para identificar las horas con mayor demanda de conectividad y saturación en el rango de direcciones IP. La Figura 7 muestra el comportamiento de asignación dinámica de direcciones IP con un tiempo de arrendamiento fijo de 3600 segundos en la red 10.115.34.0/24 con saturación y sobrecarga de mensajes en horas pico (zona sombreada), en donde persiste el registro de 245 usuarios en un lapso de 90 minutos.



**Figura 7.** Saturación del rango de direcciones IP de la subred 10.115.34.0/24 del día 1.

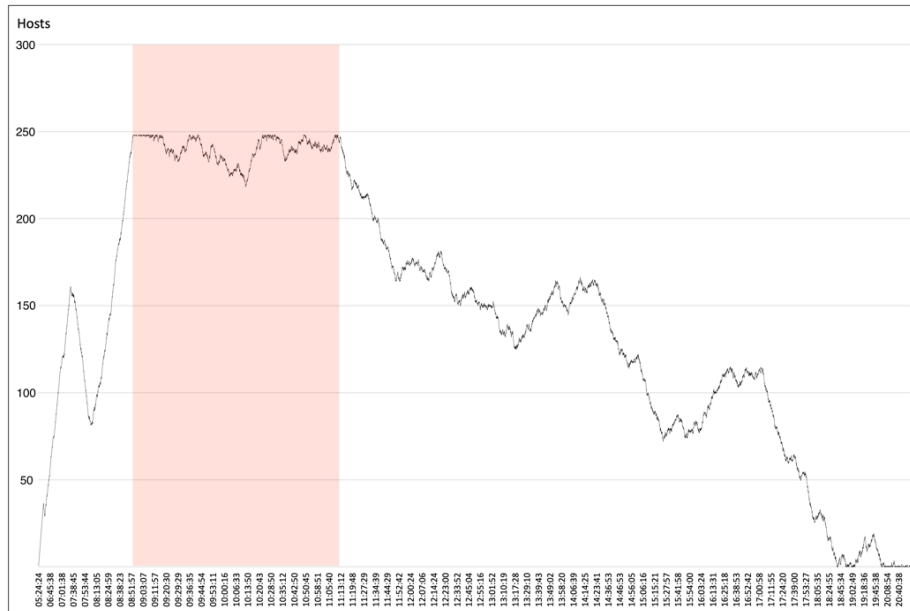
El cambio en la funcionalidad del servidor DHCP utilizando el algoritmo inteligente supera el problema de disponibilidad en un nivel del segmento de red, reduciendo el tiempo de arrendamiento a 1800 segundos. La Figura 8 muestra que la reducción del tiempo de arrendamiento en un factor aceptable  $D$  incrementa el uso del espacio de direcciones durante los periodos de baja demanda, pero no incrementa sustancialmente el uso del espacio de direcciones en los picos sobre los tiempos fijos de arrendamiento de 1800 segundos, presumiblemente porque también se pueden reclamar rápidamente los arrendamientos para los clientes que son transitorios. La reducción del tiempo de arrendamiento en las direcciones de una subred es la estrategia que hace más eficiente el uso del rango de direcciones, alcanzando una mejora del 98% de direcciones IP asignadas, ya que se puede apreciar que en lapsos de 3 a 10 minutos se observa saturación de forma intermitente.





**Figura 8.** Ajuste del tiempo de arrendamiento a 1800 segundos en la subred 10.115.34.0/24 del día 1.

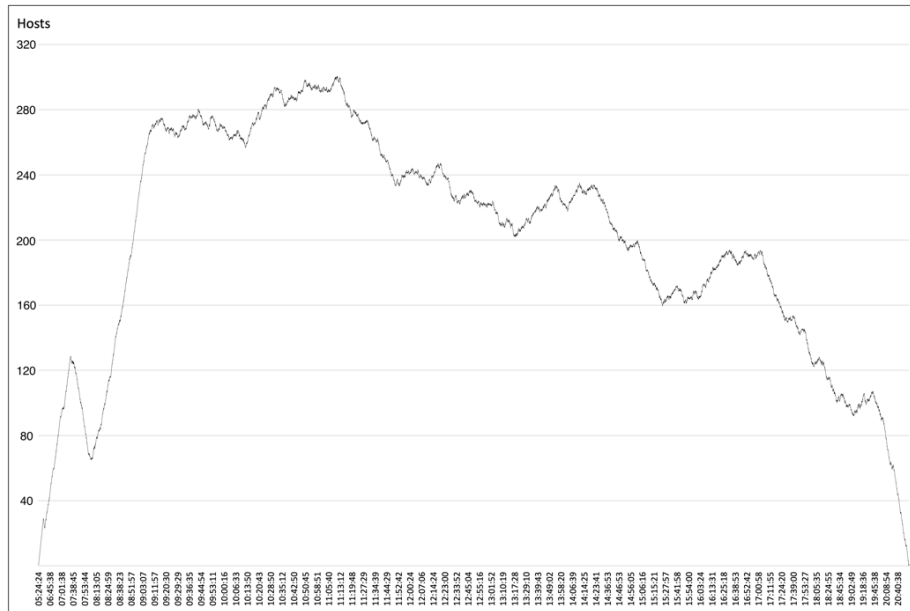
Para la segunda simulación se seleccionaron datos que correspondieron al día de mayor grado de saturación persistente en horas pico, con el fin de comprobar la mejora de la disponibilidad de la subred que durante un lapso de 165 minutos mostró mayor saturación como se observa en la zona sombreada de la Figura 9.



**Figura 9.** Saturación del rango de direcciones IP de la subred 10.115.34.0/24 del día 2.

En esta ocasión, el cambio en la funcionalidad del servidor DHCP consiste en aumentar el número de direcciones IP mediante el uso de una subred de reserva que permitió mitigar la saturación en un 100%, como muestra la Figura 10. Previo al subneteo, el número de direcciones disponibles fue de 250; al agregar la subred de reserva, se puede duplicar la disponibilidad de direcciones IP. Esta segunda estrategia presenta la ventaja de no haber momentos de saturación en comparación con la estrategia de la reducción de tiempo de arrendamiento, sin embargo, es apreciable que el máximo de solicitudes recibidas en esta subred fue de 288, que es muy inferior al total de direcciones IP disponibles, lo que representa un desperdicio de direcciones IP. Por lo tanto, esta segunda estrategia presenta esta desventaja.

La interfaz gráfica de usuario desarrollada permite monitorear todas las subredes configuradas en el servidor DHCP, permitiendo detectar de manera rápida problemas de saturación en el rango de direcciones IP de una subred y alertar de forma visual al administrador de red sobre la saturación presentada y el ajuste que se aplicó automáticamente para solucionar el problema (reducción del tiempo de arrendamiento o incremento del rango de direcciones IP mediante el uso de la subred de reserva). Entre sus características está la complejidad algorítmica utilizada para determinar su eficiencia, su confiabilidad en la resolución del problema, su facilidad de uso al ser un sistema intuitivo, y su facilidad de configuración y de mantenimiento. En este sentido, los atributos de ubicuidad, disponibilidad y flexibilidad, propios de los sistemas web, la convierten en una solución perfecta para el monitoreo de las diferentes subredes de una institución. El usuario, además de visualizar su funcionamiento automático, puede también utilizar la funcionalidad de la consola para monitorear y configurar de forma manual el estado de disponibilidad de una subred.



**Figura 10.** Ajuste del rango de direcciones IP con subred de reserva para la subred 10.115.34.0/23 del día 2.

## 5. Conclusiones

A pesar del uso generalizado del DHCP y de la importancia de configurar adecuadamente los recursos de la red, como el tiempo de arrendamiento y el rango de direcciones IP, las violaciones e ineficiencias en la asignación de direcciones son frecuentes en entornos relativamente abiertos. Los métodos actuales fluctúan al proporcionar una solución a uno de los problemas inherentes al DHCP, la saturación de direcciones IP en una asignación dinámica. Este trabajo da un paso más hacia la desmitificación de este proceso con tres contribuciones principales: se realizó un estudio de los patrones de uso del DHCP en una red del campus universitario con mayor afluencia de usuarios conectados para identificar las horas pico y la sobrecarga de peticiones de conectividad en un día ordinario, considerando que la movilidad y la concentración de usuarios pueden analizarse utilizando los registros del servidor DHCP, se observó que los hábitos de los usuarios pueden analizarse mediante la distribución temporal de sus dispositivos inalámbricos, y que el tiempo en línea de los dispositivos inalámbricos es inferior al tiempo de arrendamiento asignado; por lo anterior, se desarrolló un algoritmo inteligente para analizar el comportamiento de las subredes e identificar aquellas con problemas de saturación aplicando automáticamente dos soluciones posibles: la primera consiste en disminuir en un factor aceptable el tiempo de arrendamiento de las direcciones IP, y la segunda consiste en aumentar el rango de direcciones IP mediante el uso de una subred de reserva adyacente superior definida para cada subred, aplicando esta segunda solución cuando ya no es posible reducir el tiempo de arrendamiento; y se implementó una herramienta visual para ayudar a los administradores de red a monitorear el estado actual y los cambios aplicados en la red.

Los resultados de las pruebas realizadas muestran que los métodos de ajuste propuestos representan una mejora notable en la disponibilidad y asignación dinámica de direcciones IP a los clientes DHCP, mejorando la conectividad en un 98% al disminuir el tiempo de arrendamiento y en un 100% al aumentar la disponibilidad de direcciones IP. Estas técnicas presentadas podrían aplicarse a cualquier red con DHCP de gran escala.

## Bibliografía

- [1] Vladimir Brik, Jesse Stroik, Suman Banerjee, “Debugging DHCP Performance”, Association for Computing Machinery (AMC). Proceedings of the 2004 ACM SIGCOMM Internet Measurement Conference, 2004, pp. 257-262. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1028788.1028822>
- [2] W. A. Syafei, Y. A. A. Soetrisno, and A. B. Prasetijo, “Simple Smart Algorithm for Flexibility of Dynamic Allocation in DHCP Server for SOHO Wireless Router”, CENIM 2020 - Proceeding: International Conference on Computer Engineering, Network, and Intelligent Multimedia, 2020, pp. 321–325. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CENIM51130.2020.9297852>
- [3] J. Xu, L. Wang, and Z. Xu, “An enhanced saturation attack and its mitigation mechanism in software-defined networking,” Computer Networks, vol. 169, p. 107092, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.107092>
- [4] G. Bianchi, “IEEE 802.11-saturation throughput analysis”, IEEE Communications Letters, vol. 2, pp. 318–320, 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/4234.736171>
- [5] Q. Lyu and H. bo Wang, “User behavior and devices analysis of a large-scale wireless local area network based on DHCP”, DEStech Transactions on Computer Science and Engineering, vol. 0, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12783/dtcse/smce2017/12400>
- [6] I. Papapanagiotou, E. M. Nahum, and V. Pappas, “Configuring DHCP leases in the smartphone era”, Proceedings of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Conference, IMC, pp. 365–370, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2398776.2398814>
- [7] R. Fan, R. Droms, N. Griffeth, and N. Lynch, “The DHCP failover protocol: A formal perspective”, Lecture Notes in Computer Science, vol. 4574 LNCS, pp. 211–226, 2007. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-73196-2\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73196-2_14)
- [8] C. Miao, J. Wang, T. Ji, H. Wang, C. Xu, F. Li, and F. Ren, “A behavioraware dynamic adaptive configuration on DHCP in wireless lans”, Proceedings-International Conference on Network Protocols, vol. 2019, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICNP.2019.8888048>
- [9] M. Khadilkar, N. Feamster, M. Sanders, and R. Clark, “Usage-based DHCP lease time optimization”, Proceedings of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Conference, pp. 71–76, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1298306.1298315>
- [10] L. E. Gallardo-Hernández and J. R. MendozaVarela, “Implementación de servicio DHCP de alta disponibilidad con software libre,” pp. 1–217, 2010. [Online]. Available: <https://uaml.page.link/ingeniusGHLE>
- [11] N. Alcott, DHCP for Windows 2000: Managing the Dynamic Host Configuration Protocol. O’Reilly Media, 3 2001. [Online]. Available: <https://uaml.page.link/ingeniusAlcottN>
- [12] M. Stokely, “Freebsd handbook : the freebsd documentation project,” 2003. [Online]. Available: <https://uaml.page.link/ingeniusStokely>
- [13] T. V. Van-Do, “An efficient solution to a retrieval queue for the performability evaluation of DHCP”, Computers & Operations Research, vol. 37, pp. 1191–1198, 7 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/J.COR.2009.05.014>
- [14] UASLP, “Información financiera y presupuestaria anual - UASLP.” [Online]. Available: <https://uaml.page.link/ingeniusUASLP>
- [15] H. Wang, J. H. Wang, J. Wang, W. Dang, J. Xue, F. Li, and J. Shan, “Squeezing the gap: An empirical study on DHCP performance in a large-scale wireless network”, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 28, pp. 832–845, 4 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TNET.2020.2971551>
- [16] C. Schroder, Linux Networking Cookbook, 2007. [Online]. Available: <https://uaml.page/link/ingeniusSchroder>.

