



# Tietoliikenteen simulointi

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Tieto- ja viestintäteknikan insinööri (AMK)

Syksy 2024

Oskari Koski

Tieto- ja viestintätekniikan insinööri

Tekijä Oskari Koski

Työn nimi Tietoliikenteen simulointi

Ohjaajat Marko Grönfors (HAMK), Tommi Hytönen (Puolustusvoimat)

Tiivistelmä

Vuosi 2024

---

Tietoliikenteen simuloinnilla on keskeinen rooli tietoverkkojen suunnittelussa, testauksessa ja optimoinnissa. Simulointityökalut tarjoavat hallitun ja joustavan ympäristön, jossa voidaan mallintaa eri ohjelmisto- ja laitteistokomponenttien käyttäytymistä, testata konfiguraatioita ja arvioida suorituskykyä erilaisissa verkkoympäristöissä. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan ja vertaillaan erilaisia verkkosimulointiohjelmistoja ja -työkaluja ja analysoidaan niiden ominaisuuksia, vahvuuksia ja rajoitteita. Tämän analyysin avulla työn tavoitteena on toimia oppaana verkkosimulointiohjelmistojen arvioinnissa ja valinnassa kutakin käyttötarkoitusta varten.

Verkkosimulointiohjelmiston valinta riippuu simuloinnin tavoitteista, sillä eri työkalut keskittyvät verkkojen eri osa-alueisiin. Jotkin työkalut on suunniteltu ensisijaisesti verkkotopologioiden mallintamiseen, joten ne soveltuvat hyvin erilaisten tietoliikennekonseptien opettamiseen ja verkkolaitteiden toiminnan ymmärtämiseen. Toiset työkalut keskittyvät pakettitason analyysiin, ja niiden avulla voidaan analysoida pakettien siirtoa ja eri tietoliikenneprotokollien suorituskykyä.

Verkkosimulointiohjelmistojen arvioinnissa keskeisiä kriteereitä ovat muun muassa ohjelmiston ominaisuudet, käytettävyys, skaalautuvuus ja suorituskyky, joten tässä opinnäytetyössä keskitytään pitkälti näihin aisoihin. Lisäksi työssä tarkastellaan ohjelmistojen lisensointia, sekä muita mahdollisia kustannusseikkoja, joita ohjelmistoihin saattaa liittyä.

Ohjelmistojen tutkimuksen teoriapohja pohjautuu pääosin ohjelmiston kehittäjän tekemiin dokumentaatioihin, sekä joihinkin käytännön tutkimuksiin. Käytännön tutkimusten tarkoituksena on saada kuva ohjelmiston käytettävyydestä käytännössä.

Avainsanat Simulointi, tietoliikenne, tietoverkot

Sivut 19 sivua

---

Network simulation plays a crucial role in the design, testing, and optimization of network systems. It provides a controlled, flexible environment to model the behavior of different software and hardware components, test configurations, and evaluate performance in different kinds of network environments. This thesis presents a review and comparison of various network simulation software and tools, analyzing their capabilities, strengths and limitations, through which it aims to provide a guide for evaluating and selecting network simulation software for each use case.

The selection of network simulation software depends on the goals of the simulation, as different tools focus on different aspects of networks. Some tools are primarily designed for modeling network topologies, making them well suited for teaching networking concepts and understanding the relationships between different kinds of devices within a network. Others focus on packet-level analysis, which can be used to analyze packet transmission and protocol performance.

Key criteria for evaluating network simulation software include feature set, usability, scalability, and performance, so this thesis largely focuses on these points. Additionally, it examines open source versus proprietary options and other possible cost consideration that comes with some software.

The theoretical basis for the software research is mainly based on documentation by the software developer, as well as some practical research. The purpose of practical research is to get an idea of the usability of the software in practice.

Keywords Simulation, telecommunication, networks

Pages 19 pages

# Sisällys

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Johdanto .....                                      | 1  |
| 2     | Tietoliikenteen simulointi .....                    | 2  |
| 2.1   | Tietoliikenteen simuloinnin käyttötarkoitukset..... | 2  |
| 2.2   | Simuloinnin rajoitteet.....                         | 2  |
| 2.3   | Simuloinnin ja emuloinnin ero .....                 | 3  |
| 3     | Simuloinnin tyypit.....                             | 3  |
| 3.1   | Verkon kuvaaminen ja toiminnan todentaminen.....    | 4  |
| 3.2   | Verkon kuormituksen testaaminen .....               | 4  |
| 3.3   | Langallisen liikenteen simulointi .....             | 4  |
| 3.4   | Langattoman liikenteen simulointi .....             | 4  |
| 4     | Ohjelmistot.....                                    | 5  |
| 4.1   | GNS3.....   | 5  |
| 4.1.1 | Käyttöjärjestelmä- ja laitteistovaatimukset .....   | 6  |
| 4.1.2 | Ominaisuudet .....                                  | 6  |
| 4.2   | Cisco Packet Tracer.....                            | 7  |
| 4.2.1 | Käyttöjärjestelmä- ja laitteistovaatimukset .....   | 7  |
| 4.2.2 | Ominaisuudet .....                                  | 8  |
| 4.3   | Ns-3.....   | 9  |
| 4.3.1 | Käyttöjärjestelmä- ja laitteistovaatimukset .....   | 10 |
| 4.3.2 | Ominaisuudet .....                                  | 10 |
| 4.3.3 | NS3:n käyttö.....                                   | 11 |
| 4.4   | OMNeT++ .....                                       | 14 |
| 4.4.1 | Laitteisto- ja käyttöjärjestelmävaatimukset.....    | 14 |
| 4.4.2 | Ominaisuudet .....                                  | 15 |
| 5     | Yhteenveto.....                                     | 16 |
| 5.1   | Pohdinta .....                                      | 17 |
|       | Lähteet .....                                       | 18 |

# 1 Johdanto

Tietoliikenteen simulointia voidaan käyttää moneen eri tehtävään, kuten opettamiseen, verkkojen toiminnan testaamiseen, analysointiin ja optimointiin. Näiden tehtävien sisältö voi kuitenkin vaihdella suuresti. Jossain tapauksissa verkkojen testaaminen voi tarkoittaa lähiverkkotopologian luontia ja testaamista, kun taas toisissa tilanteissa se voi tarkoittaa protokollatason tietoliikenneanalyysia, tai uuden protokollan luomista ja testaamista simuloitussa ympäristössä.

Erilaisiin simulointitehtäviin on eri ohjelmistoja, jotka eroavat toisistaan ominaisuuksissa, käytettävyydessä ja suorituskyvyssä. Tässä opinnäytetyössä tavoitteena on tehdä vertailu ja yhteenveto eri simulointiohjelmistoista, kuten GNS3, Cisco Packet Tracer, Ns-3 ja OMNeT++. Tavoitteena on selvittää minkä tyyppiseen simulointiin mikäkin ohjelmisto soveltuu parhaiten, sekä niiden kykyä mallintaa erilaisia verkkoympäristöjä, kuten langallisia ja langattomia verkkoja.

Muita huomioon otettavia ominaisuuksia simulointiohjelmissa ovat ohjelmiston saatavuus ja lisensointi. Jotkut ohjelmistot ovat avoimen lähdekoodin ohjelmia, jotka ovat täysin ilmaisia, kun taas toiset voivat olla täysin maksullisia, tai ilmaisia ainoastaan opetuskäyttöön. Kaikki tässä työssä käsiteltävät ohjelmistot ovat täysin ilmaisia, tai ilmaisia opetuskäyttöön.

Työn alkukappaleissa käydään läpi, mitä tietoliikenteen simuloinnilla tarkoitetaan, miksi sitä tehdään, ja mitä mahdollisia rajoitteita simuloinnissa on. Siinä myös selitetään simulointiin liittyviä termejä. Tämän jälkeen tarkastellaan eri simulointiohjelmia ja niiden ominaisuuksia.

## 2 Tietoliikenteen simulointi

Tietoliikenteen simulointi tarkoittaa prosessia, jossa tietokoneohjelmaa käytetään mallintamaan tietoverkon toimintaa. Tämä saavutetaan luomalla tietoliikenteessä käytetyistä laitteista ja protokollista ohjelmistopohjainen malli, joka simuloi laitteiden kuten reitittimien, kytkimien, palomuurien ja päätelaitteiden toimintaa.

Simuloitujen laitteiden ja protokollien tulee jäljittää oikeiden laitteiden ja protokollien toimintaa mahdollisimman tarkasti, jotta simulointiohjelman toiminta ja tulokset ovat realistisia ja verrattavissa oikeaan elämään.

### 2.1 Tietoliikenteen simuloinnin käyttötarkoitukset

Viime vuosikymmeninä tietoverkot ovat kehittyneet monimutkaisemmiksi ja nopeammiksi, mikä tekee niiden analysoinnista hyvin haastavaa. Tietoverkkojen alkuaikoina verkkojen analysointiin voitiin käyttää erilaisia matemaattisia teorioita, kuten jonotusteoriaa, mutta nykypäivän verkkolaitteiden monimutkaisuus ja nopeus ovat tehneet simuloinnista lähes välttämätöntä realististen skenaarioiden analysoimiseksi. (Fujimoto, R. & Perumalla, K. & Riley, G. 2007, s. 1)

Tietoliikenteen simulointia käytetään verkkojen tutkimukseen, kehittämiseen ja testaukseen, esimerkiksi verkon toiminnan testauksessa, protokollien analysoinnissa, verkon rasituksen testaamisessa ja uusien verkkoteknologioiden testauksessa. Simulointiohjelmiä voidaan myös käyttää opetustarkoituksessa opettamaan tietoverkkojen, protokollien ja erilaisten verkkolaitteiden toimintaa.

### 2.2 Simuloinnin rajoitteet

Yksi simulaattorien ongelma on rajallinen realismi. Vaikka simulaattorit pyrkivät mallintamaan todellisten verkkojen ja verkkolaitteiden toimintaa, ne eivät välttämättä osaa tai pysty ottamaan huomioon kaikkia todellisten verkkojen toimintaan vaikuttavia tekijöitä, kuten laitteistovaihteluita, ympäristöolosuhteita tai muita ennalta arvaamattomia tapahtumia.

Rajoitteita voi myös syntyä skaalauksessa, jos simuloitava verkko kasvaa liian suureksi, se vaatii paljon laskentatehoa ja muistia simulaatiota suorittavalta tietokoneelta. Simulaation tuloksien analysointi voi myös olla vaikeaa suurissa simulaatioissa. (Rampfl, S. (2013) s. 1-2)

## 2.3 Simuloinnin ja emuloinnin ero

Tietoliikenteen simulointi tarkoittaa täysin ohjelmistopohjaista mallia, joka toimii samoilla muuttujilla kuin oikea järjestelmä. Simulaatio on suljettu sitä suorittavan ohjelmiston sisälle, eikä se kommunikoi ulkopuolisten laitteiden kanssa.

Emulointi tarkoittaa ohjelman tai laitteen käyttöä toisen ohjelman tai laitteen toiminnan jäljittelyyn. Esimerkki tästä voisi olla tietokoneohjelmalla emuloitu reititin. Emuloitu reititin pystyy toimimaan verkossa oikean laitteen tavoin ja se pystyy kommunikoimaan muille verkkolaitteille.

Emulointia voidaan käyttää testaamaan laitteen tai ohjelmiston toimintaa reaali maailmassa ilman itse laitetta tai ohjelmistoa.

## 3 Simuloinnin tyypit

Tietoliikenteen simulointi voidaan jakaa moneen eri tyyppiin, joko simuloinnin tarkoituksen perusteella tai käytettyjen verkkotekniikoiden perusteella. Yleinen käyttötarkoitus simuloinnille on tietoverkkojen ja laitteiden toiminnan analysointi ja testaaminen. Tätä tehdään usein esimerkiksi opetuskäytössä, koska simulointiohjelma helpottaa verkon toiminnan visualisointia, eikä välttämättä tarvita fyysisiä laitteita.

Toinen yleinen käyttötarkoitus on tietoverkkojen ja tietoliikenneprotokollien toiminnan ja suorituskyvyn testaaminen. Protokollien analysointiin tarvitaan yleensä simulointiohjelmisto, jossa on mahdollista muokata protokollien toimintaa tai testata uusia protokollia.

Suurin osa suosituista tietoliikennesimulaattoreista ovat diskreetin tapahtuman simulaattoreita. Tämä tarkoittaa, että simuloitun järjestelmän käyttäytyminen esitetään sarjana erillisiä tapahtumia, joista kukin tapahtuu tietyssä ajankohtana ja vaikuttaa järjestelmän tilaan. Simuloitavan järjestelmän tila muuttuu, kun tapahtumia tapahtuu ja niitä käsitellään. Nämä tilanmuutokset voivat olla esimerkiksi muutoksia järjestelmän sisällä olevien entiteettien määrässä ja ominaisuuksissa, muutoksia resurssien saatavuudessa sekä sisäisten muuttujien ja parametrien päivityksiä.

Diskreetin tapahtuman simulointi eroaa esimerkiksi jatkuvasta simuloinnista, jossa järjestelmät mallinnetaan jatkuvina prosesseina, jotka kehittyvät ajan myötä differentiaaliyhtälöiden tai muiden jatkuvien matemaattisten kaavojen mukaisesti.

### **3.1 Verkon kuvaaminen ja toiminnan todentaminen**

Verkon kuvaamiseen ja toiminnan todentamiseen keskittyvässä simuloinnissa ideana on luoda virtuaalinen malli koko verkosta ja sen laitteista, kuten kytkimistä reitittimistä, tukiasemista ja päätelaitteista. Simulointiohjelmissa verkkolaitteet voidaan konfiguroida oikeiden laitteiden tapaan ja niiden välillä voi lähettää verkkoliikennettä toiminnan testaamiseksi.

Yleisimpiä ohjelmia tämän tyyppiseen simulointiin ovat Cisco Packet Tracer, GNS3.

### **3.2 Verkon kuormituksen testaaminen**

Verkon kuormitukseen keskittyvässä simuloinnissa tavoitteena on kuvata verkko simulointiohjelmalla ja generoida siihen liikennettä eri tiedonsiirtoprotkollia käyttäen oikean verkon tapaan. Tämä tehdään verkon ja sen laitteiden kapasiteetin ja kuormituksen testaamiseksi.

Yleisimpiä tämän tyyppiseen simulointiin käytettyjä ohjelmistoja ovat Ns-3 ja sen vanhempi versio ns-2, sekä esimerkiksi OMNeT++.

### **3.3 Langallisen liikenteen simulointi**

Useimmiten tietoverkkojen simuloinnissa simuloitavat verkot ovat langallisia verkkoja ja useat simulointiohjelmitot ovat pääosin suunniteltu langalliselle liikenteelle. Langallisen liikenteen simulointi on yleensä helpompaa ja tulokset ovat luotettavampia kuin langattomalla liikenteellä.

Yleensä kaikkia simulointiohjelmistoja voidaan käyttää langallisen liikenteen simulointiin.

### **3.4 Langattoman liikenteen simulointi**

Langattoman liikenteen simulointi on vaikeampaa, koska tiedonsiirtoon vaikuttavia tekijöitä on enemmän. Langattomassa tiedonsiirrossa pitää ottaa huomioon tukiasemien ja muiden laitteiden etäisyys, sekä fyysiset esteet, jotka voivat vaikuttaa langattoman signaalin kulkuun. Fyysisiä esteitä kuten talojen seiniä on usein vaikea tai mahdoton simuloida simulointiohjelmistoilla.

Yleisimpiä langattoman liikenteen simulointiin käytettyjä ohjelmistoja ovat Ns-3, ns-2 ja GNS3. Cisco Packet Traceria voidaan myös käyttää kuvaamaan langattomia verkkoja.

## 4 Ohjelmistot

Tietoliikenteen simulointiin on useita eri ohjelmistoja, jotka ovat tehty erilaisiin simulointitarpeisiin. Seuraavaksi tarkastelemme neljää eri simulointiohjelmistoa ja niiden vahvuuksia ja heikkouksia. Tärkeimpiä ominaisuuksia simulointiohjelmistolle ovat toiminnallisuus, suorituskyky ja käytettävyys, joten näissä aiheissa tulee olemaan pääpaino.

### 4.1 GNS3

GNS3 on vuonna 2008 julkaistu avoimen lähdekoodin tietoverkkojen simulaatio-ohjelmisto, jota voi käyttää myös emulointiin. GNS3 on ilmainen, mutta virtuaalisten verkkolaitteiden saatavuus ohjelmistossa on vaihtelevaa. Ohjelmisto sisältää oletuksena vain muutaman eri verkkolaitteen ja laitteita lisätessä käyttäjän tarvitsee hankkia virtuaalinen versio halutusta laitteesta. Virtuaalilaite tarkoittaa ohjelmistopohjaista laitetta, joka sisältää todellisen laitteen toiminnallisuuden. Virtuaalilaitteita voidaan myös käyttää emuloimaan oikeaa laitetta oikeassa verkkoympäristössä. Suurimmalla osalla verkkolaittevalmistajista on virtuaalilaitteita, joita voidaan käyttää GNS3:ssa. Esimerkkejä näistä ovat Ciscon IOS kuvat, Fortinetin Fortigate palomuurien "virtual appliance", Palo Alton palomuurien PA-VM ja Checkpointin Checkpoint vSEC. (GNS3, n.d.-a) & (GNS3, n.d.-b)

Virtuaalilaitteiden saatavuus vaihtelee laitevalmistajan mukaan. Joidenkin laitteiden virtuaalinen versio on saatavilla ilmaiseksi internetissä, mutta joskus käyttäjän tarvitsee hankkia fyysinen laite saadakseen virtuaalilaite.

GNS3 on laajasti käytetty ohjelmisto erilaisiin simulointitarpeisiin, joita voivat olla esimerkiksi todellisten verkkojen emulointi, konfigurointi, testaus tai vianmääritys. Ohjelmisto on suunniteltu loputtomiin skaalautuvaksi, joka tarkoittaa, että simuloitu verkkotopologia voi olla kuinka suuri tahansa ja ainoa rajoite siihen on isäntäkoneen muisti ja laskentateho. Yhden verkkotopologian voi myös hajauttaa usealle palvelimelle tai pilvipalvelimille.

#### **4.1.1 Käyttöjärjestelmä- ja laitteistovaatimukset**

GNS3 toimii nativisti Windows, Linux ja MacOS käyttöjärjestelmillä. Windowsilla vanhin tuettu versio on Windows 7 (64 bit) ja MacOS vanhin tuettu versio on Mavericks (10.9). Linuxilla mikä tahansa jakelu toimii.

Minimilaitteistovaatimukset GNS3:lle ovat kaksi loogista prosessoriydintä, 4 GB käyttömuistia ja 1 GB tallennustilaa ja suositellut laitteistovaatimukset ovat 4 loogista prosessoriydintä, 8 GB käyttömuistia ja 35 GB SSD tallennustilaa.

Minimivaatimukset tarkoittavat, että ohjelmisto periaatteessa toimii tällä laitteistolla, mutta koska GNS3:n resurssienkulutus riippuu verkkotopologian koosta ja muista tekijöistä, ohjelmisto ei välttämättä toimi käytännössä kovin hyvin tällä laitteistolla. Suositellut vaatimukset tarkoittavat, että suurimmassa osassa käyttötapauksista tämä laitteisto pitäisi riittää, mutta jos verkkotopologia on liian suuri, voidaan tarvita vielä enemmän suorittimen ytimiä, muistia ja tallennustilaa. (GNS3, n.d.-a)

#### **4.1.2 Ominaisuudet**

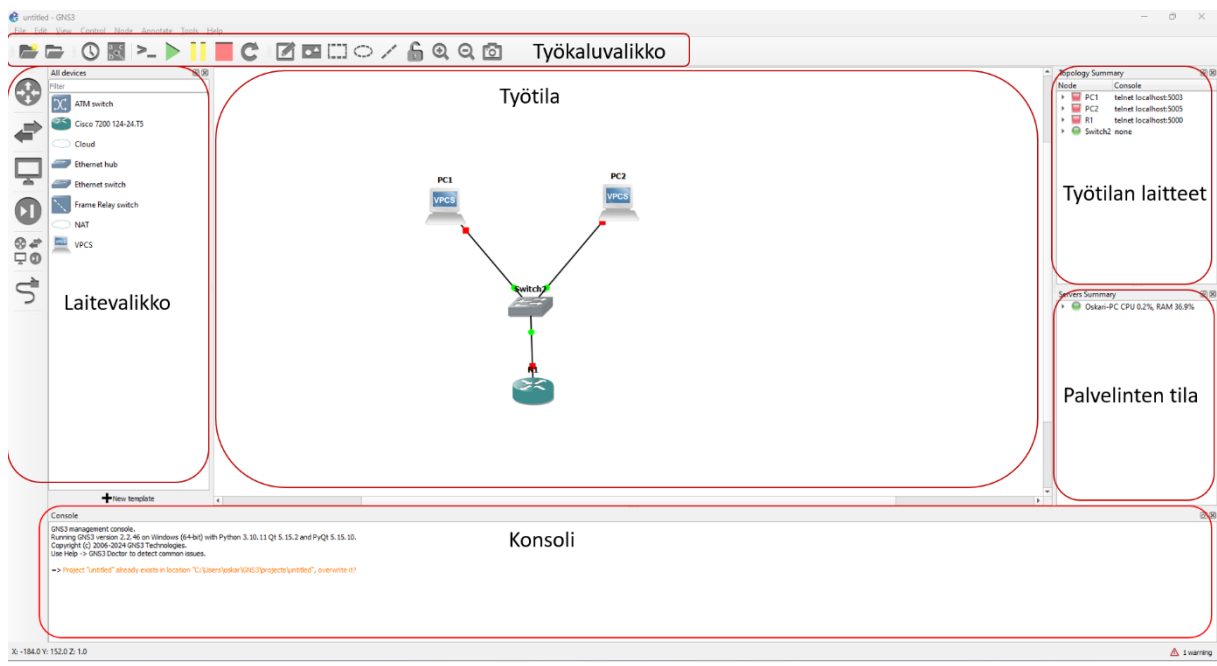
GNS3:n pääominaisuus on verkkotopologian luonti ja testaaminen. Tämän tekeminen ohjelmistossa on helppoa graafisen käyttöliittymän ansiosta, jossa käyttäjä voi hiirellä vetää eri laitteita työtilaan. Laitteiden konfigurointi toimii samalla tavalla kuin oikeasti, esimerkiksi Ciscon reitittimet ja kytkimet konfiguroidaan komentorivillä ja komennot ovat samoja kuin oikeissa laitteissa.

GNS3 ei itsessään tue protokollia samalla tavalla kuin esimerkiksi Cisco Packet Tracer. Protokollatuki määräytyy käytettyjen laitteiden perusteella. Käytännössä ohjelmisto tukee kaikkia protokollia joita siinä käytetyt verkkolaitteet tukevat.

GNS3:sta on tavallinen versio, joka asennetaan paikallisesti suoraan isäntäkoneelle. Tämän lisäksi on GNS3 VM, joka toimii virtuaalikoneella. Tuettuja virtualisointialustoja ovat VirtualBox, VMware Workstation and fusion, VMware ESXi ja Microsoft Hyper-V. Ohjelmiston kehittäjät suosittelivat käyttämään VM-versiota suurimmassa osassa tapauksista Windows ja MacOS käyttöjärjestelmillä välttääkseen yleisiä ongelmia, kuten Qemu-tuen puutetta Windowsissa. GNS3 tukee myös virtuaalikoneiden integrointia verkkotopologiaan, tämä tarkoittaa, että topologiaan voidaan sisällyttää esimerkiksi virtuaalipalvelin, joka suorittaa palvelinohjelmistoa. (GNS3, n.d.-a)

GNS3 tukee automaatio- ja skriptiominaisuuksia Pythonin avulla, joka mahdollistaa erilaisten testaus ja konfiguraatiotehtävien automatisoinnin. Ohjelmisto sisältää myös erilaisia paketinkaappaukseen ja pakettien analysointiin liittyviä ominaisuuksia käyttäen Wiresharkia. Wireshark on paketinkaappaukseen ja -analysointiin tehty ohjelmisto, joka on integroitu GNS3:een. (GNS3, n.d.-a)

GNS3:n käyttöliittymä:



## 4.2 Cisco Packet Tracer

Cisco Packet Tracer on Ciscon kehittämä ja ylläpitämä simulointiohjelmisto, jota käytetään kuvaamaan ja todentamaan verkkojen toimintaa. Ohjelmiston saa ladata ilmaiseksi, jos käyttäjä on ilmoittautunut Ciscon verkkokurssille, jossa ohjelmistoa käytetään. Packet Tracer on suunniteltu opetuskäyttöön ja sitä käytetään paljon tietoverkkoihin ja tietoliikenteeseen liittyvien kurssien opetuksessa sekä Ciscon, että ulkopuolisten opetuslaitoksien toimesta.

Toisin kuin GNS3, Packet Tracer sisältää paljon eri Ciscon laitteita valmiina ohjelmistossa, eikä laitteiden IOS kuvia tarvitse hankkia erikseen.

### 4.2.1 Käyttöjärjestelmä- ja laitteistovaatimukset

Packet Tracerin 64 bit versio vaatii Windows (64 bit), Ubuntu tai MacOS käyttöjärjestelmän. Tuetut versiot ovat Windowsille 8.1 tai uudempi, Ubuntuille 20.04 ja 22.04 LTS ja MacOS:lle

10.14 tai uudempi versio. Packet Tracerista on myös 32 bit versio, joka on suunniteltu käytettäväksi Windows 8.1 ja Windows 10 (32 bit) käyttöjärjestelmillä.

Minimilaitteistovaatimukset Packet Tracerille ovat (x86-64) suoritin, 4GB käyttömuistia ja 1.4 GB vapaata tallennustilaa. (Cisco Packet Tracer 8.2 Frequently Asked Questions, 2023)

Toisin kuin GNS3, Packet Tracerin muistin ja laskentatehon käyttö eivät kasva huomattavasti riippuen verkkotopologian koosta. Tämä siis tarkoittaa, että ohjelmisto pitäisi toimia aina samaan tapaan riippumatta mihin sitä käytetään.

#### 4.2.2 Ominaisuudet

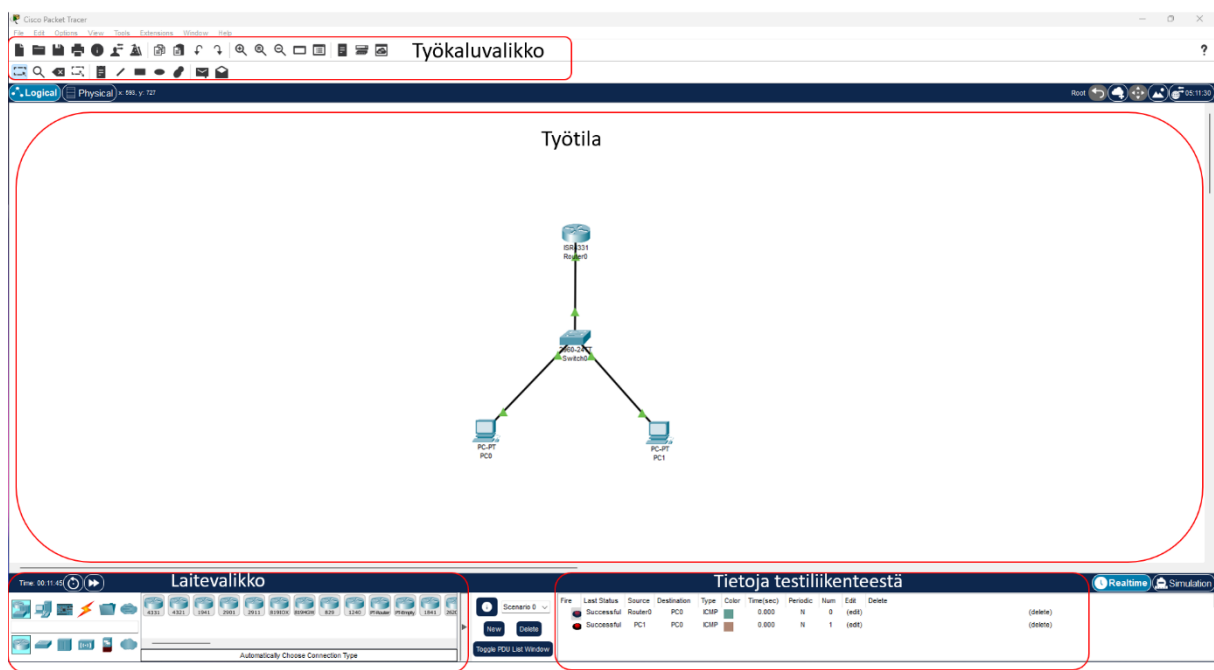
Packet Tracerin pääominaisuuksia ovat verkkotopologian luonti, verkkolaitteiden konfigurointi ja niiden testaaminen. Ohjelmisto sisältää paljon eri Ciscon verkkolaitteita kuten, reitittämiä, kytkimiä, tukiasemia ja muita laitteita, mutta koska ohjelmisto on Ciscon luoma, se sisältää vain Ciscon verkkolaitteita. Packet Tracer ei myöskään tue kaikkia samoja ominaisuuksia mitä oikeat laitteet tukevat, koska se käyttää yksinkertaistettuja malleja verkkolaitteista ja tiedonsiirtoprotokollista. Ciscon mukaan "Harjoittelu Packet Tracerilla ei korvaa oikeilla laitteilla tapahtuvaa harjoittelua".

Packet Tracer tukee suurta määrää eri tasoisia tiedonsiirtoprotokollia. Taulukko tuetuista protokollista: (Cisco Packet Tracer 8.2 Frequently Asked Questions, 2023)

| Kerros         | Packet Tracerin tukemat protokollat  |
|----------------|--|
| Sovelluskerros | FTP, SMTP, POP3, HTTP, TFTP, Telnet, SSH, DNS, DHCP, NTP, SNMP, AAA, ISR, VOIP, MQTT, SCCP config and calls ISR command support, Call Manager Express                |
| Kuljetuskerros | TCP and UDP, TCP Nagle Algorithm & IP Fragmentation, RTP   |
| Verkkokerros   | BGP, IPv4, ICMP, ARP, IPv6, ICMPv6, IPsec, RIPv1/v2/ng, Multi-Area OSPF, OSPFv3, EIGRP, EIGRPv6, Static Routing, Route Redistribution, Multilayer Switching, L3 QoS, |

|                    |  |
|--------------------|--|
|                    | NAT, CBAC, Zone-based policy firewall, and Intrusion Protection System on the ISR, GRE VPN, IPsec VPN, HSRP, CEF, SPAN/RSPAN, L2NAT, PTP, REP, LLDP  |
| Siirtoyhteyskerros | Ethernet (802.3), 802.11, HDLC, Frame Relay, PPP, PPPoE, STP, RSTP, VTP, DTP, CDP, 802.1q, PAgP, L2 QoS, SLARP, Simple WEP, WPA, EAP, VLANs, CSMA/CD, EtherChannel, DSL, 3/4 G network support |

Packet Tracerin käyttöliittymä:



### 4.3 Ns-3

Ns-3 on avoimen lähdekoodin tietoliikennesimulaattori, joka soveltuu etenkin paketti- ja protokollatason simulointiin. Ensimmäinen Ns (networks simulator) versio kehitettiin vuosina 1995–1997 Lawrence Berkeley National Laboratoryn toimesta. Tämän jälkeen ohjelmisto on ollut jatkuvan kehityksen alla. Ohjelmiston toinen versio, eli Ns-2 julkaistiin vuonna 2000 ja kolmas versio, Ns-3 vuonna 2008. Ns-3 on ilmainen, avoimen lähdekoodin ohjelmisto, joka on lisensoitu GNU GPLv2 -lisenssillä ja sitä ylläpitää ja kehittää maailmanlaajuinen yhteisö.

Ohjelmistoa käytetään laajasti tutkimus- ja opetustyössä erilaisissa simulointitehtävissä. Verrattaessa ohjelmistoa muihin simulointiohjelmiin kuten GNS3:een tai Cisco Packet Traceriin, Ns-3 mahdollistaa simuloinnin matalammalla tasolla kuin muut ohjelmistot. Tätä

ns. matalamman tason simulointia kutustaan protokollatason simuloinniksi. Protokollatason simuloinnilla voidaan tutkia esimerkiksi erilaisten tietoliikenneprotokollien toimintaa ja suorituskykyä. (Ns-3, n.d.-a)

#### **4.3.1 Käyttöjärjestelmä- ja laitteistovaatimukset**

Ns-3 toimii Linuxilla, Windowsilla ja MacOS:llä. Linuxilla minimi tuettu versio on Ubuntu 18.04 LTS, muiden Linux jakeluiden toiminta voi olla vaihtelevaa. Windowsilla tuettu versio on Windows 10, MacOS:llä käyttöjärjestelmäversiota ei ole mainittu. Ohjelmiston kehittäjät eivät myöskään ole maininneet laitteistovaatimuksia. (Ns-3, n.d.-b)

#### **4.3.2 Ominaisuudet**

Ns-3:n suurin etu verrattuna muihin simulointiohjelmistoihin on protokollatason simulointi. Se mahdollistaa tiedonsiirtoprotokollien käyttäytymisen simuloinnin yksittäisten pakettien tasolla. Tätä voidaan käyttää esimerkiksi protokollien käyttäytymisen tai suorituskyvyn tutkimisessa ja uusien protokollien kehittämisessä.

Ns-3 sisältää ominaisuuksia, joilla voidaan testata ja analysoida verkon ja eri tiedonsiirtoprotokollien suorituskykyä erilaisissa olosuhteissa. Tähän tärkeitä työkaluja ovat erilaiset mittaustietojen keräykseen tehdyt työkalut. Ns-3:ssa tällaisilla työkaluilla voi kerätä tietoa esimerkiksi pakettien läpäisykyvystä, häviämistäasteesta, päästä päähän -viiveestä, pakettien toimitussuhteesta ja verkon käyttöasteesta. (Ns-3, n.d.-e)

Esimerkkinä protokollatason suorituskykyanalyysistä voisi olla simulaatioskenaario, jossa haluamme selvittää miten vaihteleva viive ja pakettihäviö vaikuttaa tiedonsiirtonopeuteen eri TCP-protokollaversioilla. Tätä voitaisiin lähteä testaamaan esimerkiksi tutkimalla, kuinka nopeasti TCP-yhteys saavuttaa täyden tiedonsiirtonopeuden verkossa jossa on korkea tai alhainen viive ja tekemällä saman testin eri TCP versioilla (esim TCP Reno vs TCP Cubic).

Ns-3:n sisällä ohjelmiston ominaisuudet ovat jaettu ns. malleihin (engl. model). Jokainen näistä malleista keskittyy johonkin tiedonsiirron osa-alueeseen tai tekniikkaan, jota voidaan simuloida tai käyttää osana simulaatiota. Tällä hetkellä ohjelmisto sisältää 35 mallia. Esimerkkejä näistä malleista ovat LTE-moduuli, joka sisältää mobiililaajakaistaverkkoihin liittyviä ominaisuuksia ja Internet models, joka sisältää IP, TCP, reititys ja UDP ja näihin liittyviä tekniikoita ja protokollia. (Ns-3, n.d.-e)

Oletuksena Ns-3 ei sisällä graafista käyttöliittymää, vaan käyttöliittymä on tekstipohjainen. Tämä tekee ohjelmistosta vaikeampikäyttöisen kuin useat muut simulaattorit. Ns-3:ssa simulaatiot toimivat Python tai C++ ohjelmointikielillä kirjoitetuilla skripteillä. Verkkotopologian luonnissa apuna toimii ohjelmiston sovellusrajapinta (API), joka sisältää valmiita luokkia erilaisille verkkolaitteille, kuten reitittimille, kytkimille ja tukiasemille. (Ns-3, n.d.-e)

Koska Ns-3 on avoimen lähdekoodin ohjelmisto, sen pohjalta on tehty muita ohjelmistoja ja lisäosia, jotka lisäävät käyttöliittymään graafisia elementtejä. Yksi tällainen ohjelmisto on NetAnim. NetAnim on Qt-työkalupakettiin perustuva offline-animaattori, joka animoi aiemmin suoritettua simulaation käyttämällä simulaation aikana luotua XML-tiedostoa. NetAnimia ei ole ylläpidetty aktiivisesti vuoden 2017 jälkeen. (Ns-3, n.d.-e)

Toinen lisäosa, joka tuo graafisia elementtejä Ns-3:een on PyViz. PyViz on live-simuloinnin visualisointiin tehty ohjelma, joka on kehittäjän mukaan hyödyllinen etenkin debuggauksessa. PyVizillä voidaan esimerkiksi helposti nähdä miten paketit liikkuvat, missä paketteja pudotetaan, jne. Mukana on myös sisäänrakennettu interaktiivinen python-konsoli, jota voidaan käyttää käynnissä olevien objektien tilan debuggaamiseen. (Ns-3, n.d.-e)

### 4.3.3 NS3:n käyttö

Kuten aikaisemmin mainittiin, NS3:ssa simulaation parametrit ja sen toiminta pitää kirjoittaa joko C++ tai Python ohjelmointikielillä. Liite 1 on esimerkki yksinkertaisesta "point to point", eli kahden laitteen välisestä C++ simulointitiedostosta. Käydään läpi mitä tiedosto pitää sisällään.

Ensimmäiseksi tiedostossa määritetään simulaatiossa käytetyt ns3 moduulit "#include" komennoina. Tässä simulaatiossa käytetyt moduulit ovat application-module, core-module, internet-module, network-module ja point-to-point-module.

Skriptin alkaa riviltä 29, koodilla "using namespace ns3;" Tämä tarkoittaa, että simulaatio käyttää ns3 nimiavaruutta ja siihen sisältyviä luokkia ja funktioita.

Riveillä 42 ja 43 luodaan säiliö solmulle ja kaksi solmua, koodilla:

```
NodeContainer nodes;  
nodes.Create(2);
```

Solmu tarkoittaa verkkolaitteiden, kuten reitittimien, kytkinten tai tietokoneiden välistä yhteyspistettä, joka voi vastaanottaa ja lähettää tietoa päätepisteestä toiseen.

Seuraavilla kolmella rivillä käytetään PointToPointHelper luokkaa asettamaan laitteiden väliseksi tiedonsiirtonopeudeksi 5 Mbps ja linkin viiveeksi 2 millisekuntia.

```
PointToPointHelper pointToPoint;  
pointToPoint.SetDeviceAttribute("DataRate", StringValue("5Mbps"));  
pointToPoint.SetChannelAttribute("Delay", StringValue("2ms"));
```

Seuraavaksi asennetaan point-to-point laitteet aikaisemmin luotuihin solmuihin. Tämä onnistuu helposti käyttämällä ns3 nimiavaruuteen sisältyvää PointToPointHelper luokkaa.

```
NetDeviceContainer devices;  
devices = pointToPoint.Install(nodes);
```

Tämän jälkeen otetaan käyttöön Ipv4AddressHelper luokan, jota käytetään IP-osoitteiden määrittämisessä laitteille:

```
Ipv4AddressHelper address;  
address.SetBase("10.1.1.0", "255.255.255.0");  
  
Ipv4InterfaceContainer interfaces = address.Assign(devices);
```

Tässä verkon osoitteeksi asetettiin 10.1.1.0 ja aliverkonpeitteeksi 255.255.255.0 ja osoitteet annettiin laitteille.

Seuraavaksi luodaan UDP echo palvelimen, joka on toinen simulaatiossa käytetyistä laitteista. Numero 9 tarkoittaa, että palvelin käyttää porttia numero 9.

```
UdpEchoServerHelper echoServer(9);
```

Tämän jälkeen asennetaan edellisellä rivillä luotu UDP palvelin toiselle laitteelle. Palvelin on konfiguroitu käynnistymään yhden sekunnin päästä simulaation alusta ja pysähtymään 10 sekunnin päästä simulaation alusta.

```
ApplicationContainer serverApps = echoServer.Install(nodes.Get(1));  
serverApps.Start(Seconds(1.0));  
serverApps.Stop(Seconds(10.0));
```

Seuraavaksi luodaan ja konfiguroidaan UDP client, eli asiakaslaite, joka kommunikoi palvelimen kanssa.

```
UdpEchoClientHelper echoClient(interfaces.GetAddress(1), 9);
echoClient.SetAttribute("MaxPackets", UIntegerValue(1));
echoClient.SetAttribute("Interval", TimeValue(Seconds(1.0)));
echoClient.SetAttribute("PacketSize", UIntegerValue(1024));
```

Ensimmäisellä rivillä luodaan asiakaslaite portille 9 samalla tavalla kuin palvelin. Seuraavilla kolmella rivillä määritellään, että asiakas lähettää palvelimelle yhden paketin yhden sekunnin välein ja paketin koko on 1024 tavua.

Seuraavaksi asennetaan client-ohjelmiston toiselle laitteelle ja määritetään, että se käynnistyy kahden sekunnin päästä simulaation alusta ja pysähtyy 10 sekunnin päästä.

```
ApplicationContainer clientApps = echoClient.Install(nodes.Get(0));
clientApps.Start(Seconds(2.0));
clientApps.Stop(Seconds(10.0));
```

Viimeiseksi simulaatio aloitetaan komennolla:

```
Simulator::Run();
```

Ja lopetetaan komennolla:

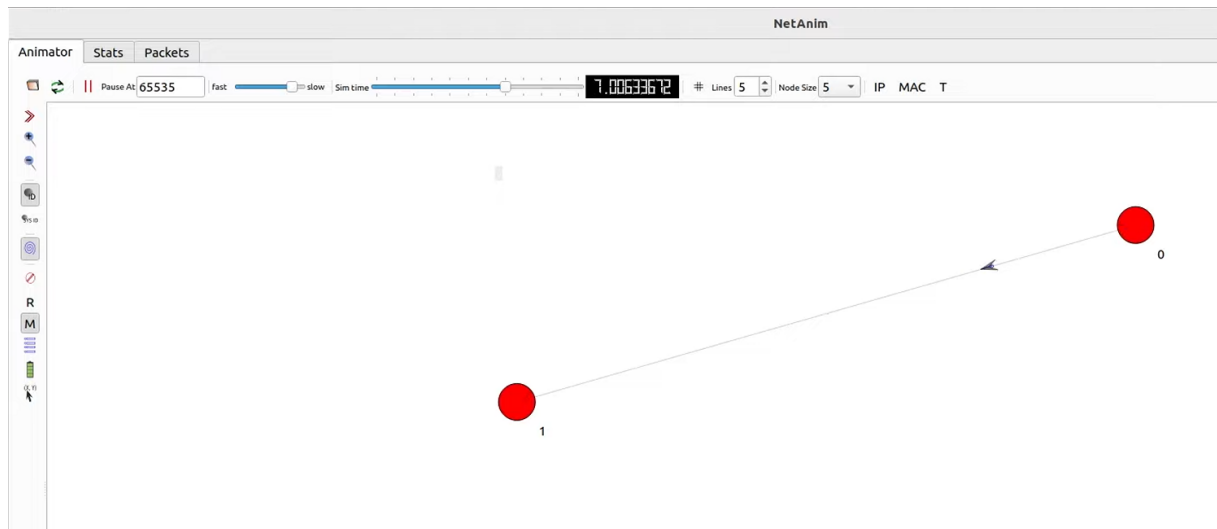
```
Simulator::Destroy();
```

Simulaatitiedoston voi suorittaa komennolla `./ns3 run <polku tiedostoon>/<tiedoston nimi>`. Kun simulaatio on ajettu, tulokset näkyvät konsolissa.

```
At time +2s client sent 1024 bytes to 10.1.1.1 port 8080
At time +2.00517s server received 1024 bytes from 10.1.1.2 port 49153
At time +2.00517s server sent 1024 bytes to 10.1.1.2 port 49153
At time +2.01034s client received 1024 bytes from 10.1.1.1 port 8080
At time +3s client sent 1024 bytes to 10.1.1.1 port 8080
At time +3.00517s server received 1024 bytes from 10.1.1.2 port 49153
At time +3.00517s server sent 1024 bytes to 10.1.1.2 port 49153
At time +3.01034s client received 1024 bytes from 10.1.1.1 port 8080
At time +4s client sent 1024 bytes to 10.1.1.1 port 8080
At time +4.00517s server received 1024 bytes from 10.1.1.2 port 49153
At time +4.00517s server sent 1024 bytes to 10.1.1.2 port 49153
At time +4.01034s client received 1024 bytes from 10.1.1.1 port 8080
```

Simulaation suorittamisessa voidaan myös käyttää NetAnim moduulia, joka tuo graafisen käyttöliittymän. Sen käyttämiseksi simulaatitiedostoon tarvitsee lisätä "AnimationInterface anim("tiedoston\_nimi.xml)". Seuraavan kerran kun simulaatio suoritetaan se luo uuden XML

tiedoston, joka voidaan avata NetAnim ohjelmassa. Simulaation suorittaminen NetAnimissa näyttää tältä:



## 4.4 OMNeT++

OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) on C++ ohjelmointikieltä käyttävä diskreetti tapahtumasimulointikehys, jota käytetään ensisijaisesti tietoverkkojen simulointiin. Vaikka ohjelmiston nimi sisältää sanan "network", ohjelmisto ei siis itsessään ole verkkosimulaattori, vaan se on simulointikehys (engl. framework). Sanalla "network" tarkoitetaan laajempaa kokonaisuutta, joka kattaa langalliset ja langattomat viestintäverkot, piirien sisäiset verkot, jonotusverkot ja niin edelleen. Ohjelmisto ei myöskään sisällä eri simulointitarpeisiin tarvittavia toimintoja valmiiksi, kuten internet protokollia verkkojen simulointiin, vaan ne ovat itsenäisiä lisäosia, jotka käyttäjä voi tarpeensa mukaan lisätä ohjelmistoon. (OMNeT++, n.d.-c)

OMNeT++ käyttää Academic Public License -lisenssiä, joka tarkoittaa, että sitä voi käyttää ilmaiseksi ei-kaupallisessa käytössä, kuten opetuksessa. Ohjelmistosta on myös kaupalliseen käyttöön tehty versio, jonka nimi on OMNEST.

### 4.4.1 Laitteisto- ja käyttöjärjestelmävaatimukset

OMNeT++ on testattu ja tuettu Windowsilla, Linuxilla ja MacOS:llä. Windowsissa mikä tahansa versio toimii x86\_64 arkkitehtuurilla. Linuxissa testattuja jakeluita ovat Ubuntu,

Fedora 33, Red Hat ja OpenSUSE. MacOS tuettuja versioita ovat 10.15 ja 11.x (x86\_64). (OMNeT++, n.d.-d)

Näiden lisäksi simulaatioita voidaan ajaa lähes millä tahansa unix-käyttöjärjestelmällä, joka sisältää C++ kääntäjän.

#### 4.4.2 Ominaisuudet

OMNeT++ käyttää modulaarista arkkitehtuuria. Tämä tarkoittaa, että simulaatiomallit rakentuvat erilaisista moduuleista, joista jokainen sisältää pienen osan simulaation kokonaisuutta. Moduulit ovat yleensä kirjoitettu C++ kielellä, ja ne voivat sisältää esimerkiksi algoritmeja tai tietorakenteita. Yksittäistä moduulia kutsutaan yksinkertaiseksi moduuliksi (engl. simple module). Monta erillistä yksinkertaista moduulia voidaan yhdistää ns. porttien kautta, josta saadaan yhdistelmämoduuli. Moduuleja voidaan myös käyttää uudelleen eri projekteissa. (OMNeT++, n.d.-b)

OMNeT++:n suurin hyöty verrattuna muihin simulaatio-ohjelmistoihin on sen tuki muulle simuloimille, kuin pelkästään tietoliikenteelle. Tämän avulla tietoverkkosimulaatioihin on mahdollista yhdistää esimerkiksi erilaisten antureiden ja sensoreiden simuloimista.

OMNeT++ tukee NED (Network Description Language) verkkojen kuvauskieltä. NED on korkean tason kieli, jota käytetään verkkotopologioiden kuvaamiseen. Sen avulla voidaan määrittellä moduulit, yhteydet ja parametrit selkeästi ja helposti. (OMNeT++, n.d.-b)

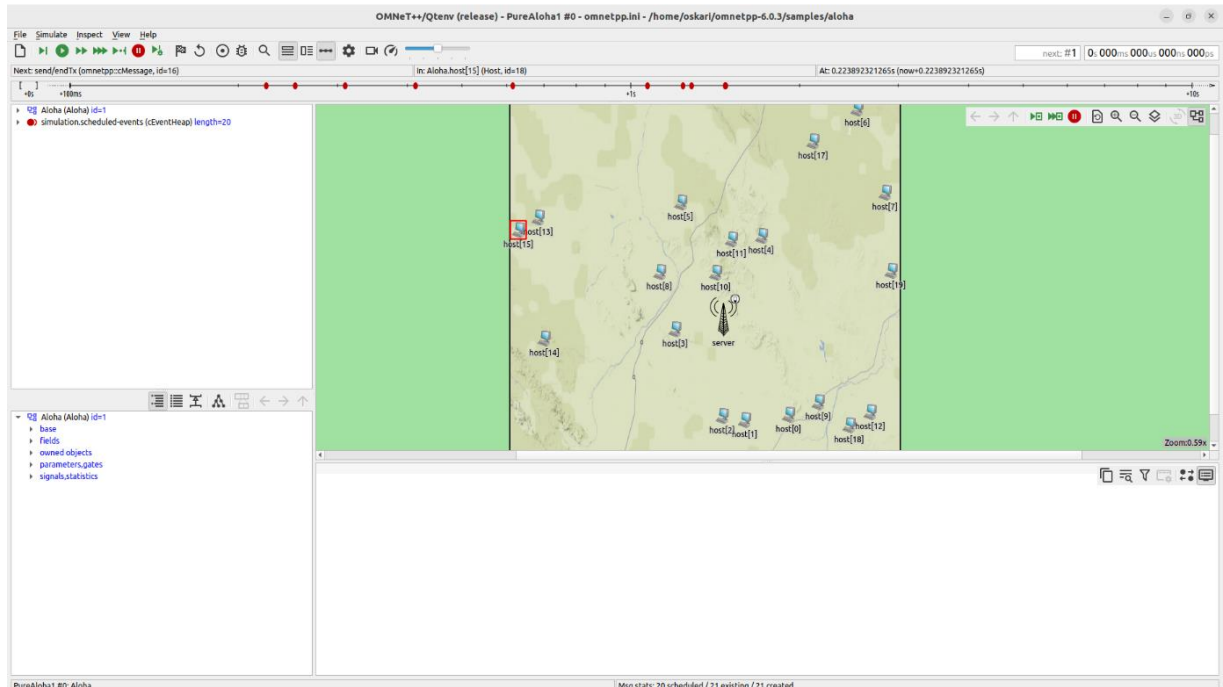
Esimerkki NED koodista, joka luo verkkoon kaksi solmua ja luo niiden välille yhteyden 100Mbps tiedonsiirtonopeudella:

```
//  
// A network  
//  
network Network  
{  
  submodules:  
    node1: Node;  
    node2: Node;  
  
  connections:  
    node1.port++ <--> {datarate=100Mbps;} <--> node2.port++;}
```

OMNeT++ sisältää graafisen käyttöliittymän, jota voidaan käyttää simulaatioiden luomiseen ja suorittamiseen. Tämä tekee sen käytöstä helpompaa kuin esimerkiksi NS3. Graafisen käyttöliittymän huono puoli on se, että se voi heikentää suorituskykyä etenkin suurissa simulaatioissa, joissa on paljon eri laitteita. Ohjelmistoa voidaan myös käyttää

tekstipohjaisella käyttöliittymällä, joka saattaa olla parempi vaihtoehto esimerkiksi automaattisten skriptien, tai muiden toistuvien tehtävien suorittamiseen. (OMNeT++, n.d.-b)

Kuvassa OMNeT++:n graafinen käyttöliittymä:



OMNeT++ tukee myös rinnakkaista hajautettua simulointia. Tämä tarkoittaa, että yksi simulaatio voidaan jakaa usealle suorittimen ytimelle tai usealle suorittimelle eri tietokoneissa. Tämä parantaa ohjelmiston suorituskykyä etenkin laajassa simulaatiossa. Ohjelmisto käyttää useita eri mekanismeja rinnakkaisten osioiden väliseen viestintään, esimerkiksi MPI:tä (Message Passing Interface) ja nimettyjä putkia (engl. named pipes). Rinnakkaisia hajautettuja simulaatioita voidaan myös suorittaa graafisella käyttöliittymällä, josta käyttäjä näkee yksityiskohtaisia tietoja simulaation suorittamisesta. (OMNeT++, n.d.-b)

## 5 Yhteenveto

Kaikilla simulointiohjelmistoilla on omat vahvuudet, heikkoudet sekä käyttökohteet. GNS3 soveltuu parhaiten ammattikäyttöön ja reaali maailman skenaarioihin. GNS3:n uniikkina ominaisuutena on emulointituki, jonka avulla ohjelmistoa voidaan käyttää korvaamaan fyysisiä laitteita. GNS3:n suurin heikkous on virtuaalisten laitteiden saatavuus ohjelmistossa. Laitteiden virtuaalisten IOS kuvien saatavuus ilmaiseksi on huono.

Cisco Packet Tracer on taas suosituin ohjelmisto etenkin opetuskäyttöön. Ohjelmisto on helppokäyttöinen ja sitä käytetään monilla eri verkkokursseilla sekä lähiopetuksessa monissa

oppilaitoksissa. Packet Tracer sisältää valmiiksi paljon eri Ciscon laitteita, mutta muita kuin Ciscon laitteita ei ole saatavilla. Packet Tracer käyttää yksinkertaistettuja malleja verkkolaitteista ja tiedonsiirtoprotokollista, jotka riittävät opetustarkoituksiin, mutta ne eivät välttämättä tuota realistisia tuloksia esimerkiksi erilaisissa suorituskykyanalyyseissä tai suurikokoisten verkkojen toiminnan analysoinnissa.

Ns-3 soveltuu parhaiten yksityiskohtaiseen verkkojen ja tietoliikenneprotokollien toiminnan ja suorituskyvyn analysointiin. Ns-3:n vahvuus on mukauttaminen ja simulointimallien tarkkuus. Ohjelmassa on mahdollista mukauttaa tietoliikenneprotokollien toimintaa tai tehdä kokonaan uusia protokollia. Ns-3 ei kuitenkaan ole helppokäyttöinen ohjelma. Oletuksena se ei sisällä graafista käyttöliittymää ja graafisia ominaisuuksia tuovat lisäosat ovat hyvin rajallisia. Ns-3:n käyttöön käyttäjän tulee osata joko C++ tai Python ohjelmointikieltä skriptipohjaisten simulaatioiden luontiin.

OMNeT++ soveltuu lähes kaikkeen simulointiin, koska se on simulointikirjasto, eikä yksittäinen ohjelmisto. Jos tavoitteena on simuloida tietoverkkojen lisäksi jotain muita verkkoja, kuten anturiverkkoja, OMNeT++ on soveltuva valinta. OMNeT++ voidaan myös käyttää protokollatason simulointiin ja protokollia voidaan mukauttaa, tai luoda kokonaan uusia, kuten Ns-3:ssa. OMNeT++:ssa on graafinen käyttöliittymä, joka sisältää ison osan toiminnallisuudesta, mutta ohjelmointitaidoista voi olla hyötyä erilaisten skriptien käytössä, jotka saattavat nopeuttaa työtä.

## 5.1 Pohdinta

Työn tavoitteena oli tehdä yhteenveto ja vertailu suosituista tietoliikenteen simulointiin käytetyistä ohjelmistoista ja työkaluista. Keskeisiä vertailukohteita ohjelmistoissa olivat niiden ominaisuudet, käytettävyys, skaalautuvuus ja suorituskyky, sekä yleisemmällä tasolla ohjelmistojen käyttötarkoitus ja soveltuvuus erilaisiin simulointitehtäviin.

Koen että tavoitteisiin päästiin kohtalaisesti. Jokaisen ohjelmiston kohdalla yllä mainittuja asioita käsiteltiin ainakin jollain tasolla, tosin niiden käsittely olisi voinut olla yksityiskohtaisempaa ja sisältää enemmän käytännön testaamista.

## Lähteet

Fujimoto, R. & Perumalla, K. & Riley, G. (2007) Network Simulation

Rampfl, S. (2013) Network Simulation and its Limitations

[https://www.net.in.tum.de/fileadmin/TUM/NET/NET-2013-08-1/NET-2013-08-1\\_08.pdf](https://www.net.in.tum.de/fileadmin/TUM/NET/NET-2013-08-1/NET-2013-08-1_08.pdf)

GNS3. (n.d.-a). Documentation. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://docs.gns3.com/docs/>

GNS3. (n.d.-b). Marketplace. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://www.gns3.com/marketplace/featured>

GNS3. (n.d.-c). Which emulator should I use? Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://docs.gns3.com/docs/emulators/which-emulators-should-i-use/>

Cisco Packet Tracer 8.2 Frequently Asked Questions (2023)

<https://www.netacad.com/sites/default/files/cisco-packet-tracer-faq.pdf>

Robinson, S. Simulation: The Practice of Model Development and Use (2004)

Ns-3. (n.d.-a). About. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://www.nsnam.org/about/>

Ns-3. (n.d.-b). Installation Guide. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://www.nsnam.org/docs/installation/ns-3-installation.pdf>

Ns-3. (n.d.-c). Data collection manual. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://www.nsnam.org/mediawiki/images/7/7a/Ns-3-data-collection-manual.pdf>

Ns-3. (n.d.-d). Wiki. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://www.nsnam.org/wiki>

Ns-3. (n.d.-e). Manual. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://www.nsnam.org/docs/manual/html/index.html#>

Ns-3. (n.d.-f). Tutorial, building topologies. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://www.nsnam.org/docs/tutorial/html/building-topologies.html>

OMNeT++. (n.d.-a). Documentation. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://omnetpp.org/documentation/>

OMNeT++. (n.d.-b). Simulation Manual. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://doc.omnetpp.org/omnetpp/manual/>

OMNeT++. (n.d.-c). Intro. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://omnetpp.org/intro/>

OMNeT++. (n.d.-d). Installation Guide. Haettu 10.11.2024 osoitteesta

<https://doc.omnetpp.org/omnetpp/InstallGuide.pdf>