



UNIVERSITATEA “POLITEHNICA” DIN BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ ETTI-B

Nr. Decizie din

TEZĂ DE DOCTORAT

Contribuții la dezvoltarea și implementarea rețelelor
definite prin programe soft

Contributions to the development and
implementation of Software-Defined Networks

Doctorand: **Ing. Liviu-Alexandru STANCU**

Conducător de doctorat: **Prof. Dr. Ing. Simona HALUNGA**

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. Dr. Ing. Gheorghe BREZEANU	de la	Univ. “Politehnica” din București
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Ing. Simona HALUNGA	de la	Univ. “Politehnica” din București
Referent		de la	Univ. “Politehnica” din București
Referent		de la	Univ. “Politehnica” din București
Referent		de la	Univ. “Politehnica” din București

București 2017

Muṭumiri

Cuprins

Mulțumiri	iii
Lista tabelelor	vii
Lista figurilor	viii
Lista abrevierilor	x
1 Introducere	1
1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat	1
1.2 Scopul tezei de doctorat	1
1.3 Conținutul tezei de doctorat	2
2 Introducere în rețelele definite prin software	5
2.1 Evoluția SDN	5
2.1.1 Istoria SDN	5
2.2 Standardizarea SDN	8
2.3 SDN în contextul rețelelor actuale	8
3 SDN în contextul rețelelor de transport fără fir	9
3.1 Modelul informațional pentru microunde - ONF TR-532	9
3.2 Modelul informațional de bază - ONF TR-512	9
3.3 Protocolul NETCONF	9
3.4 Alegerea unui cadru pentru serverul NETCONF	9
3.5 Arhitectura demonstrațiilor de concept WT SDN	9
4 Mediatorul cu valori implicite - prima versiune	11
4.1 Arhitectura	11
4.2 Implementarea	11
4.3 Folosirea în contextul demonstrațiilor de concept	11
5 Mediatorul cu valori implicite - a doua versiune	13
5.1 Arhitectura	13
5.2 Implementarea	13
5.3 Folosirea în contextul demonstrațiilor de concept	13
5.4 Integrarea cu LINC	13

6	Simulatorul rețelelor de transport de date fără fir	15
6.1	Arhitectura	15
6.2	Implementarea	15
6.3	Folosirea în contextul demonstrațiilor de concept	15
7	Rezultate și discuții	17
7.1	Evaluarea soluțiilor propuse	17
7.2	Comparație între WTE și alte abordări	17
7.3	Demonstrarea cazurilor de utilizare cu ajutorul WTE	17
8	Concluzii	19
8.1	Rezultate obținute	19
8.2	Contribuții originale	19
8.3	Lista contribuțiilor originale	19
8.4	Perspective de dezvoltare ulterioară	19
	Bibliografie	21

Lista tabelelor

Lista figurilor

Lista abrevierilor

DVM	Default Values Mediator
IoT	Internet of Things
NCP	Network Control Point
NETCONF	Network Configuration Protocol
ONF	Open Networking Foundation
OT	Optical Transport
PoC	Proof of Concept
SDN	Software-Defined Networking
TR	Technical Recommendation
WT	Wireless Transport
WTE	Wireless Transport Emulator

Capitolul 1

Introducere

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

În urma avansurilor tehnologice recente în toate domeniile, în general și în domeniul calculatoarelor și al telecomunicațiilor, în particular, a apărut nevoia de a redefini arhitectura rețelelor de comunicații, din cauza faptului că rețelele tradiționale au început să își arate limitele. În zilele noastre, există o tendință de a interconecta totul, cu ajutorul unor tehnologii care permit acest lucru, cum ar fi conceptul de *Cloud Computing*, mobilitatea, sau idei mai noi, cum ar fi *Internetul Tuturor Lucrurilor* - IoT (Internet of Things) sau sistemele de comunicații de generația a cincea - 5G. Aceste noi abordări au nevoie, pe lângă o lățime de bandă crescută, de o rețea mai simplă și agilă, unde se facilitează inovarea. Rețelele definite prin software - SDN (Software-Defined Networking), reprezintă o nouă paradigmă care a apărut în industria rețelisticii, pentru a mitiga dezavantajele pe care rețelele tradiționale le-au dovedit.

Tehnologia SDN nu este încă matură și nu a pătruns în toate tipurile de rețele de comunicații. Este prezentă în campusuri universitare, sau în centre de date, însă se încearcă introducerea acesteia în toate aspectele unei rețele de comunicații, cum ar fi transportul de date optic - OT (Optical Transport), transportul de date fără fir - WT (Wireless Transport) sau noduri de interconectare ale Internetului. Aceste încercări presupun muncă de standardizare și demonstrații de concept - PoC (Proof of Concept), pentru prezentarea avantajelor pe care această nouă paradigmă de oferă, până când tehnologia se va maturiza și va fi adoptată de toată industria rețelisticii.

1.2 Scopul tezei de doctorat

Această lucrare își propune să prezinte noua paradigmă apărută în industria rețelisticii, SDN, împreună cu avantajele pe care această abordare le poate aduce dacă ar fi aplicată în toate aspectele unei rețele de comunicații, punând accent pe rețelele de transport de date fără fir. Autorul își va prezenta activitatea de cercetare, constând în unelte software care pot fi folosite ca simulatoare de echipamente de

transport de date fără fir, ce expun interfețe folosite în tehnologia rețelelor definite prin software.

Aceste unelte software au fost folosite cu succes în procesul de standardizare SDN, care încă se desfășoară în cadrul ONF (Open Networking Foundation), facilitând testarea modelelor informaționale ce se dezvoltă în contextul rețelelor definite prin software și ușurând dezvoltarea și testarea aplicațiilor SDN care fac parte din acest ecosistem. Simulatorul rezultat în urma acestei cercetări, în forma sa finală, poate emula o întreagă rețea de echipamente de transport de date fără fir, care expun interfețe specifice SDN. El poate fi folosit de către dezvoltatorii de produse software SDN pentru rețele de transport de date fără fir, eliminând nevoia acestora de a deține astfel de echipamente scumpe pentru a-și putea testa aplicațiile. Poate fi folosit și de către operatorii care vor să lanseze această tehnologie în rețelele de producție, pentru a simula consecințele instalării unor noi aplicații anterior lansării, fără a afecta rețeaua.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Lucrarea este împărțită în opt capitole, primul prezentând domeniul abordat în teză, iar ultimul fiind dedicat concluziilor. În continuare va fi prezentat, pe scurt, conținutul fiecărui dintre celelalte capitole.

Capitolul 2 introduce domeniul rețelelor definite prin software, plecând de la istoria sa și nevoia pentru care această nouă paradigmă a apărut. Apoi va fi ilustrată activitatea de standardizare în acest domeniu, inclusiv demonstrațiile de concept conduse de către ONF, în particular de către grupul WT, care va duce la maturizarea soluției și adoptarea acesteia pe scară largă, în toate aspectele unei rețele. Tot în acest capitol se va evidenția și prezența SDN în contextul rețelelor actuale.

Cel de-al 3-lea capitol pune accent pe prezența SDN în rețelele de transport de date fără fir. Sunt prezentate modelele informaționale dezvoltate în cadrul ONF în acest context, având rolul de recomandări tehnice - TR (Technical Recommendation): *TR-532, Microwave Information Model* și *TR-512, Core Information Model*. Ulterior se vor da detalii despre NETCONF (Network Configuration Protocol), care este protocolul de bază pentru rețelele de transport de date fără fir, în contextul SDN. În următoarea secțiune se vor compara câteva cadre software cu sursă deschisă, ce oferă facilitatea unui server NETCONF. Pe baza acestei comparații s-a ales una software care va face parte din simulatorul propus în lucrare. Capitolul va fi încheiat de o prezentare a arhitecturii demonstrațiilor de concept organizate de grupul WT din ONF, ce va ajuta la înțelegerea necesității unui astfel de simulator.

Capitolul 4 prezintă prima versiune a simulatorului, numită *Mediatorul cu valori implicite* - DVM (Default Values Mediator), folosită în cel de-al doilea PoC. Se vor prezenta, pe rând, arhitectura și implementarea, iar apoi se va evidenția folosirea acestui simulator în contextul demonstrațiilor de concept.

Următorul capitol, 5, descrie cea de-a doua versiune a DVM, abordând aspecte despre arhitectura, implementare și folosire în cadrul celui de-al treilea PoC. În plus, se va evidenția încercarea de a integra acest simulator cu o soluție de comutator

software, LINC, folosit în SDN, în special în cadrul rețelelor de transport optic de date, prezentând avantajele și dezavantajele date de această abordare.

Capitolul 6 descrie ultima și cea mai avansată versiune a simulatorului rețelelor de transport de date fără fir - WTE (Wireless Transport Emulator), prezentând arhitectura, detaliile implementării și folosirea acestuia în cea de-a patra demonstrație de concept a grupului WT din cadrul ONF.

Capitolul 7 ilustrează rezultatele obținute în urma acestei cercetări și propune discuții pe baza simulatorului implementat. În primul rând, această soluție este evaluată din punctul de vedere al resurselor consumate și al extensibilității pe care o oferă. Apoi, se compară simulatorul cu alte soluții care există în momentul de față în contextul SDN. Ulterior, se prezintă câteva cazuri de utilizare, propuse în cadrul grupului WT din ONF, care pot fi demonstrate cu ajutorul simulatorului, eliminând nevoia unor echipamente de transport de date fără fir.

Capitolul 2

Introducere în rețelele definite prin software

În zilele noastre, rețelele de comunicații au devenit complexe și greu de administrat și configurat. De asemenea, numărul dispozitivelor mobile a crescut considerabil, alături de conținutul pe care acestea îl accesează. Aceste lucruri au dus la evidențierea limitărilor pe care rețelele tradiționale le presupun. Chiar dacă nu toate ideile ce stau la baza ei sunt noi, datorită unui context favorabil, acestea, împreună cu alte noi idei, au dus la apariția paradigmei SDN în industria rețelisticii.

Această nouă tehnologie nu a ajuns încă la maturitate și la adoptarea pe scară largă, în toate aspectele rețelilor, însă eforturile considerabile care se fac în activitățile de standardizare și crearea de ecosisteme SDN vor duce la această adoptare. După cum este evidențiat și în [1], se tinde către crearea unor rețele care pot fi programate prin software, crescând astfel flexibilitatea și agilitatea lor.

2.1 Evoluția SDN

2.1.1 Istoria SDN

Rețelele definite prin software își au originile în munca și ideile din cadrul proiectului OpenFlow, început la universitatea Stanford, în jurul anului 2009. Multe dintre conceptele și ideile folosite în SDN au evoluat însă în ultimii 25 de ani și acum își găsesc locul în această nouă paradigmă, care își propune să schimbe modul în care rețelele sunt proiectate și administrate.

SDN reprezintă o arhitectură nouă de rețea, în care starea de dirijare a planului de date este administrată de un plan de control distant, decuplat de cel de date. Rețelele definite prin software sunt definite ca fiind o arhitectură de rețea ce se bazează pe următoarele 4 concepte, conform [2]:

1. Decuplarea planurilor de date și de control;
2. Deciziile de dirijare se bazează pe fluxuri de date, nu pe adresa destinație;

3. Logica de control se mută într-o entitate externă, un echipament de control SDN (care are un sistem de operare de rețea);
4. Rețeaua este programabilă prin aplicații software care rulează peste sistemul de operare de rețea și care interacționează cu echipamentele din planul de date.

Rețelele definite prin programe software au apărut ca o nevoie, pentru a oferi posibilitatea inovației în cadrul administrării rețelelor și pentru a ușura introducerea de noi servicii. Aceste nevoi nu sunt însă noi, ele mai fiind studiate și în trecut, însă abia acum, prin SDN, pot fi satisfăcute într-un mod viabil, care să nu implice schimbări majore în infrastructura rețelelor deja existente.

Istoria SDN poate fi împărțită în trei etape, fiecare influențând această nouă paradigmă prin conceptele propuse, așa cum este evidențiat în [3]:

1. Rețelele active, care au introdus funcțiile programabile în rețea, sporind gradul de inovație (mijlocul anilor 1990 – începutul anilor 2000);
2. Separarea planurilor de date și de control, care a condus la dezvoltarea de interfețe deschise între planurile de date și de control (aproximativ 2001 – 2007);
3. Dezvoltarea protocolului OpenFlow și a sistemelor de operare de rețea, care reprezintă prima adoptare pe scară largă a unei interfețe deschise, făcând separarea planurilor de control și de date extensibilă și practică.

Rețelele active

Rețelele active reprezintă rețele în care comutatoarele pot efectua anumite calcule sau operații asupra pachetelor de date. Rețelele tradiționale nu pot fi considerate programabile. Rețelele active au reprezentat un concept radical asupra controlului unei rețele, propunând o interfață de programare care să expună resurse în noduri individuale de rețea și care să susțină construirea de funcționalități specifice, care să fie aplicate unui subset de pachete care tranzitează acel nod.

Motivul principal pentru care rețelele active au apărut a fost cel de accelerare a inovației. La momentul respectiv, introducerea unui nou concept, serviciu sau tehnologie, într-o rețea de mari dimensiuni, cum ar fi Internet-ul, putea dura până la zece ani, de la faza de prototip până la implementare. Se dorea ca nodurile active din rețea să permită rutelor/comutatoarelor să descarce servicii noi în infrastructura deja existentă. În același timp, aceste noduri active ar fi putut coexista fără probleme în aceeași rețea cu vechile dispozitive. Au existat două tipuri de abordări în cadrul rețelelor active, în funcție de modelul ales pentru programarea rețelei:

- *Modelul încapsulat* – unde codul care trebuia executat în cadrul nodurilor active era transportat în bandă, în pachetele de date; fiecare pachet de date conținea cod care trebuia rulat;
- *Modelul comutatoarelor programabile* – codul care trebuia executat în cadrul nodurilor active era stabilit prin mecanisme din afara benzii. Execuția programelor era determinată de antetul pachetului.

Rețelele active nu au ajuns niciodată să fie implementate pe scară largă, din mai multe cauze: momentul de timp la care au apărut acestea nu a fost potrivit; la acel moment nu aveau o aplicabilitate clară, deoarece nu apăruseră încă centrele de date sau infrastructurile cloud; implementarea rețelilor active avea nevoie și de suport hardware, care nu era tocmai ieftin, ceea ce a constituit încă un dezavantaj.

Chiar dacă rețelele active nu au ajuns să fie implementate pe scară largă, câteva idei au fost preluate în cadrul rețelilor definite prin programe soft:

- **Funcții programabile în rețea, care să faciliteze inovația.** În motivația introducerii rețelilor definite prin software se acuză dificultatea inovației în rețelele de producție. Rețelele active foloseau programarea planului de date, în timp ce în SDN se programează atât planul de control cât și cel de date.
- **Virtualizarea rețelei și capacitatea de a demultiplexa programe soft pe baza antetului pachetelor.** Rețelele active au dezvoltat un cadru arhitectural care să permită funcționarea unei astfel de platforme, având drept componente de bază un sistem de operare comun (al nodurilor), un set de medii de execuție și un set de aplicații active, care oferă de fapt un serviciu capăt-la-capăt.
- **Atenția la aparatele de rețea și la felul în care funcțiile acestora sunt compuse.** În cercetarea din cadrul rețelilor active se vorbea despre nevoia unificării gamei largi de funcții oferite de aparatele de rețea într-un cadru programabil sigur.

Separarea planurilor de date și de control

Rețelele, încă de la început, au avut planurile de date și de control integrate. Acest lucru a dus la câteva dezavantaje: îngreunarea sarcinilor de administrare a rețelei, de depanare a configurării rețelei sau de controlul/prezicerea comportamentului de dirijare.

Primele inițiative de separare a planurilor de control și de date datează din anii 1980. La acel moment, cei de la AT&T propuneau renunțarea la semnalizarea în bandă și introducerea unui Punct de Control al Rețelei - NCP (Network Control Point), realizând astfel separarea planurilor de control și de date. Această modificare a înlesnit accelerarea inovației în rețea, prin posibilitatea de introducere rapidă de noi servicii și a furnizat noi metode de a îmbunătăți eficiența, printr-o vedere de ansamblu asupra rețelei oferită de punctul de control al rețelei. Există și inițiative mai recente care și-au propus separarea planurilor de control și de date, cum ar fi ETHANE, NOX, OpenFlow. Acestea au ca avantaj faptul că nu au nevoie de modificări substanțiale în echipamentele de dirijare, ceea ce înseamnă că pot fi adoptate mai ușor de către industria rețelilor.

Ideile preluate în rețelele definite prin programe soft din cercetarea care propunea separarea planurilor de control și de date sunt următoarele:

- **Control logic centralizat care folosește o interfață deschisă către planul de date.** O interfață deschisă către planul de date, care să permită

inovația în programele soft din planul de control a fost propusă de activitățile de cercetare din cadrul ForCES. Însă, această interfață nu a fost adoptată de marile companii furnizoare de echipamente de rețea, astfel că aceasta nu a fost implementată pe scară largă.

- **Administrarea stărilor distribuite.** Controlul logic centralizat al rețelei a atras alte provocări, cum ar fi administrarea stărilor distribuite. Un echipament de control logic centralizat trebuie reprodus pentru a face față defectării acestuia. Însă această reproducere poate duce la stări de inconsistență între copiile echipamentului de control. Aceste probleme apar și în cadrul SDN, în contextul echipamentelor de control distribuite.

2.2 Standardizarea SDN

2.3 SDN în contextul rețelelor actuale

Capitolul 3

SDN în contextul rețelelor de transport fără fir

3.1 Modelul informațional pentru microunde - ONF TR-532

Istoria rețelelor definite prin software.

3.2 Modelul informațional de bază - ONF TR-512

SDN și rețelele actuale..

3.3 Protocolul NETCONF

Standardizare: ONF, etc..

3.4 Alegerea unui cadru pentru serverul NETCONF

Standardizare: ONF, etc..

3.5 Arhitectura demonstrațiilor de concept WT SDN

Standardizare: ONF, etc..

Capitolul 4

Mediatorul cu valori implicite - prima versiune

4.1 Arhitectura

SDN și rețelele actuale..

4.2 Implementarea

Istoria rețelelor definite prin software.

4.3 Folosirea în contextul demonstrațiilor de concept

Standardizare: ONF, etc..

Capitolul 5

Mediatorul cu valori implicite - a doua versiune

5.1 Arhitectura

SDN și rețelele actuale..

5.2 Implementarea

Istoria rețelelor definite prin software.

5.3 Folosirea în contextul demonstrațiilor de concept

Standardizare: ONF, etc..

5.4 Integrarea cu LINC

Standardizare: ONF, etc..

Capitolul 6

Simulatorul rețelelor de transport de date fără fir

6.1 Arhitectura

SDN și rețelele actuale..

6.2 Implementarea

Istoria rețelelor definite prin software.

6.3 Folosirea în contextul demonstrațiilor de concept

Standardizare: ONF, etc..

Capitolul 7

Rezultate și discuții

7.1 Evaluarea soluțiilor propuse

SDN și rețelele actuale..

7.2 Comparatie între WTE și alte abordări

Istoria rețelelor definite prin software.

7.3 Demonstrarea cazurilor de utilizare cu ajutorul WTE

Standardizare: ONF, etc..

Capitolul 8

Concluzii

8.1 Rezultate obținute

Istoria rețelelor definite prin software.

8.2 Contribuții originale

SDN și rețelele actuale..

8.3 Lista contribuțiilor originale

Standardizare: ONF, etc..

8.4 Perspective de dezvoltare ulterioară

Standardizare: ONF, etc..

Bibliografie

- [1] T. D. Nadeau and K. Gray, *SDN: Software Defined Networks: An Authoritative Review of Network Programmability Technologies.* " O'Reilly Media, Inc.", 2013.
- [2] D. Kreutz, F. M. Ramos, P. E. Verissimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, "Software-defined networking: A comprehensive survey," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14–76, 2015.
- [3] N. Feamster, J. Rexford, and E. Zegura, "The road to sdn: an intellectual history of programmable networks," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 44, no. 2, pp. 87–98, 2014.