

QoE-aren optimizaziorako indize-erregelen proposamenak sare-baliabideen esleipenerako planifikazioan

*Ianire Taboada**

Adierazpen Grafikoa eta Proiektuak Saila, eta Komunikazioen Ingeniaritza Saila
(UPV/EHU)

Fidel Liberal

Komunikazioen Ingeniaritza Saila
(UPV/EHU)

* ianire.taboada@ehu.es

DOI: 10.1387/ekaia.14384

Jasoa: 2015-04-28

Onartua: 2015-09-02

Laburpena: Lan honetan sakon aztertu dira erabiltzaileek hautemandako kalitatearen maximizazioa helburu duen sare-baliabideen planifikaziorako scheduling algoritmoak, beti ere sare-baliabideen esleipenean kalitate subjektiboaren maximizaziorako planifikazioaren garrantzia eta beharra buruan izanda. Ikerketak bereziki erreparatu dio matematika arloan ekarpen handia egin duten Gittins zein Whittle metodoen bidez lortutako kalitate subjektiboaren maximizaziorako scheduling indize-erregela motako soluzioen azterketei. Modu honetan, lehenik eta behin, bi diziplina horiek aurkeztu dira, Gittinsena bakunagoa izanik. Ondoren, bi planifikazio-politika horien errendimenduak elkarrekin erkatu dira, eta ikusi da Whittlen-en konponbideak emaitza nabarmenki hobea erakusten dituela. Ondorioz, Gittins edo Whittle metodoetan oinarritutako proposamena aukeratuko da.

Hitz gakoak: planifikazio-algoritmoa, hautemandako kalitatea, indize-erregela, Gittins indizea, Whittle indizea.

Abstract: Considering the importance and necessity of network resource allocation for maximizing subjective quality, this work deals with scheduling algorithms aimed at maximizing users' perception of quality. This research is focused on the analysis of subjective quality aware scheduling index rule solutions obtained by means of Gittins and Whittle methods, which have a great contribution in the mathematics area. In this way, first of all, we present the previous disciplines, being the Gittins-based simpler. Then, we compare the performance of these scheduling policies, showing that the Whittle-based solution gives considerably better results. As a conclusion, a tradeoff be-

tween the index complexity and the achievable subjective quality exists, when choosing the Gittins-based or the Whittle-based proposal.

Keywords: scheduling algorithm, quality of experience, index rule, Gittins index, Whittle index.

1. SARRERA

Ezbairik gabe, Internet behar-beharrezkoa bilakatu da eguneroko bizitzan, eta horrek datu-sareen erabilera masiboa ekarri du, bereziki sare mugikorren erabilera masiboa. Web edo multimedia bezalako Internet-aplikazioen erabileraren igoera horrek sareko banda zabalera eskaeraren hazkundera eragin du. Beraz, oso garrantzitsua da bukaerako erabiltzaileak zerbitzuaren kalitatean hornitzeko sare baliabideen partekatze eta erabilera eraginkorra izatea.

Nahiz eta telekomunikazio estandarrek zerbitzuaren kalitatea kontuan hartzen duten arkitekturak definitu [1-2], ez dute sare baliabideen kudeaketarako planifikazio-estrategia espezifikorik zehazten. Beraz, funtsezkoa da errendimendu egokia bermatzeko planifikazio-algoritmoen diseinu egokia egitea.

Tradizionalki, sare baliabideen esleipena atzerapena, abiadura edo paketeen galera bezalako sare-parametro objektiboetara bideratzen da, bukaerako erabiltzaileen benetako asetzeta alde batera utziz. Hala ere, erabiltzaileen asebetetzean oinarritutako baliabideen esleipen ikuspegi hori ezinbestekoa da, eta sare operadoreek zein hornitzaileek motibazio argia dute euren bezeroen gogobetetzea lortzeko. Horrela, lan honetan, erabiltzaileak hautemandako kalitatea optimizatzen duten planifikazio algoritmoak aztertzeari ekingo zaio.

1.1. Aurrekariak

Planifikazio-algoritmoak optimizazio problema bezala egokiro formula daitezke. Gainera, planifikatzailea kontrolatzaile modura ikus daiteke. Modu honetan, kontrol-akzioa aukeratuko den erabiltzailea zehaztean datza.

Hortaz, planifikazio algoritmo horiek kontrol edo erabaki problema bezala formula daitezke. Ildo honetan, baliabide-esleipen estokastikoaren eta dinamikoaren problemak era naturalean modela daitezke Markoven-en Erabaki Prozesuen (MDP, *Markov Decision Process*) [3-4] izenekoaren barruan.

Edonola, matematikoki dotorea da MDP-an oinarritutako optimizazio ikuspegia, baina optimizazio problema errealean ebazpenerako kontrol pro-

zesu markoviar horien erabilerak oso eragozpen larria du, zeren eta gehienetan ezin lor baitaitezke problema praktikoak ebazteko beharrezkoa den memoria prozesamendu-betekizunak [5-6].

Eragozpen hori gainditzeko, egokiagoa da baliabide-kudeaketa optimizazio problema MDP bezala formulatzea, eta ondoren, problema konplexu trataezinen soluziotzat azpioptimoa edota optimoa den heuristika erraza lortzea. Heuristika horien artean daude indize-erregela motako planifikazio-estrategiak [7-8]. Indize-erregela baten bidez, kalkulatu nahi izaten da zein den erabiltzaile bakoitzerako indize deitutako lehentasuna islatzen duen balioa, eta era honetan, planifikatzaileak indize altuena duen erabiltzailea aukeratuko du transmisio une bakoitzean.

Modu honetan, lagungarria suertatzen da planifikazio=eredu analitiko horien ebazpenerako lehentasunean oinarritutako indize-erregela motako soluzioak eskuratzea. Horrela problema horien ebazpena erraztu eta soluzio bakunak lortzen dira.

Zalantzarik gabe, gehien aztertutako baliabide esleipen problemek erabiltzaileen trafiko fluxuen batez besteko atzerapenaren minimizazioa dute helburu. Atzerapen horrek erreferentzia egiten dio tamaina finituko fluxu baten bit guztiak kanalera transmititzeko beharrezko denborari. Emaizta klasikoek adierazten dute fluxu laburrei lehentasuna emateak guztirako batez besteko atzerapena minimizatzen duela [9-10]; hau da, aldiuneko bukatze-probabilitate altuena duten fluxuak lehenesteak sistemaren batez besteko atzerapena minimizatzen du. Dena dela, egungo IP sare-sistemetan ez da ohikoa fluxuen tamaina aurretik jakitea. Hori dela eta, badira *non-anticipating* edo aurreratu gabeak deitutako aurretik fluxuaren tamaina ez dakiten tamainan oinarritutako planifikazio-diziplinak [11]. Politika horiek tamaina-informazio modura erabiltzen dute fluxu batek unera arte kanalera transferitutako bit kopurua, *attained service*-a edo eskuratutako zerbitzua.

Arlo honetan lanik aipagarriena Gittins indize estrategia da [12-13]. Gittinsek batez besteko atzerapena minimizatzeko problema MDP plataforman formulatzen du. Era honetan, eskuratutako zerbitzua kontuan hartuta, atzerapenaren batezbestekoa minimizatzen duen indize-erregela sinplea proposatzen du, kanal kapazitatea konstantea denerako.

Bestalde, azken hamarkadan haririk gabeko edo *wireless* sistemetan emandako aurrerapen teknologikoek irrtati-baliabide eskasen esleipenerako planifikazioaren interesa piztu dute erabiltzaileen artean. Haririk gabeko loturetan kanalaren kapazitatea aldatzen doa denboran zehar, inguruena beraren degradazioen ondorioz, eta horrek denboran aldakorrak diren kanaletan planifikazio problemaren ikerketa bultzatu du. *Channel-aware* deitutako planifikatzaileak kanalaren kalitatean oinarritzen dira. Horien barruan, badaude *opportunistic* deituriko politikak, erabiltzailearen kanal-ka-

litatea bere historialaren menpe ona den edo ez erabakitzen dutenak [14]. Literaturan zehar zenbait channel-aware estrategia aztertu dira, *Max Rate* eta *Proportional Fair* [15] ezagunen artean. Hala ere, ezezaguna da denboran aldakorra den zerbitzu tasa duten ereduaren soluzio optimoa lortzeko ebazpena.

[16-18] lanetan batez besteko atzerapenaren problema denboran aldakorra den kanalean MDP baten bidez formulatzen da, eredu horren osagaia erabiltzaileen aldiuneko kanal-egoera izanik. Bestalde, MDP-a analitikoki ebaztearen ezintasuna dela eta, hurbilketak erabiltzen dira. Azterketa hauek, zorizko kanal-kapazitatearen kasurako, Whittle indize ikuspegiari jarraituz [19], kanal kalitatearen menpekoak diren eta optimotik hurbil dauden indize-erregelak lortzen dira.

Whittle metodoaren arabera optimizazio problema sinplifikatu daiteke une bakoitzean batz besteko M erabiltzaile zerbitzatuz. Ondoren, erabiltzaile bakarrek salneurrian oinarritutako optimizazio problema parametrizatuan deskonposa daiteke, metodo lagrangiarrak erabilita [20]. Bai Gittins bai Whittle indizeak, erabiltzaile bakoitzerako era isolatuan kalkulatu dira, beste erabiltzaileetatik beregain independenteki. Hala ere, Gittinsen esparruan ez bezala, erabiltzailea aukeratua ez bada, erabiltzaile bakoitzaren MDP ereduaren egoera-aldaketak eta sari irabazpenak onartzen dira, *restless* deitutako problemaren motakoa izanik; kanal aldakorrek ereduak mota honetakoak dira. Ezaugarri horrek Whittle indizea Gittins indizea orokortzea eragiten du, eta problema mota horietan, orohar, Whittle indizearen errendimendua hobea da Gittins indizearena baino.

Alabaina, zerbitzuaren kalitate-parametro objektibo ezberdinak helburu dituzten planifikazio-eskemak proposatu dira literaturan zehar baina, erabiltzaileak hautemandako kalitate subjektiboaren maximizazioa xede duten baliabideen esleipen-estrategiei ez zaie behar bezalako arreta jarri. Era honetan, agerian geratzen da oso beharrezkoa dela zerbitzuaren kalitate subjektiboaren maximizazioa ekarriko duen sare-baliabideen planifikazio estrategia bat.

Erabiltzaileak hautemandako kalitatea adierazteko QoE (*Quality of Experience*) terminoa halaxe definitzen du ITU-T-k [21]: «Bukaerako erabiltzaileak hautemandako zerbitzu edo aplikazio baten onargarratasun orokorra». [22-23] lanetan proposatzen dira QoE-a maximizatzea helburu duten indize-erregelen artean aipagarrienak. Lehenengoa, Gittins ikuspegiari oinarritzen da, eta kanal konstanterako ebazten da. Bigarrenaren lorpenerako, berriz, Whittle metodoa erabiltzen da, denboran aldakorra den kanalaren kasurako.

1.2. Helburuak

Agerian dago erkaketa bat egin behar dela *QoE-aware* planifikazio eremuan hain ekarpen handia egin duten bi proposamen horien [22-23] artean. Horixe izan du lan honek helburu nagusi.

Bestalde, ekitatearen kontura metrika baten optimizazioa lortzea alderdi aipagarria da, baliabideen kudeaketa-estrategiak diseinatzerakoan [24]. Planifikazio-algoritmo bat bidezkoa izan behar da honako zentzuan: metrika baten optimizazioa bermatzeaz gain, bermatu egin behar da banako fluxuak modu justuan tratatzen ote diren, erabiltzaile batzuek emaitza oso onak lortzea eta gainontzekoak zigortzea ekidinez. Aurreko *QoE-aware* indize-erregelen lanetan batez besteko *QoE*-a landu da soilik. Hortaz, aurreko bi planifikazio proposamen horien ekitatea hartuko da azpi-helburu bezala.

Gainontzeko artikulua horrela egituratuko da: 2. atalean erkatuko diren bi *QoE-aware* indize-erregelak deskribatzen dira. Gero, 3. atalean, bi politika horien errendimenduak elkarrekin erkatuko dira. Bukatzeko, 4. atalean, lan honen ondorio garrantzitsuenak laburbilduko dira.

2. QoE-AWARE INDIZE-ERREGELAKEN DESKRIBAPENA

Atal honetan, *QoE*-aren maximizaziorako planifikazio indize-erregela deskribatuko dira. Erregela horiek, planifikazio arloan garrantzi handia izan duten metodo matematikoetan oinarria duten [22-23] lanetan proposatu dira.

Bestalde, erabiltzailearen asebetetzea batez besteko iritzi-kalifikazio (*MOS*, *Mean Opinion Score*) metrikaren bidez [25-26] eskala batean ebaluatzen da eskuarki, 1etik (kalitate oso eskasa) 5erako (kalitate bikaina). Era honetan, aztergai diren *QoE*-an oinarritutako politika horietan, erabiltzaile bakoitzeko *QoE*-a kuantifikatzen duen eta atzerapenaren menpekotasun *MOS* utilitate funtzioa erabiltzen da. Funtzio horretan hiru tarte bereiz ditzakegu: atzerapen balio baxu baten azpitiko kalitate maximoko atala, atzerapen balio altu baten gaintetiko zerbitzu jasanezineko atala, eta aurreko bi atalen arteko *QoE*-aren degradazio atala.

Lehenik eta behin, Gittins metodoaren bidez lortutako *QoE-aware* indize-erregela aurkeztuko da, *Gittins MOS* (*GM* [22]) deitutakoa. Hurrengo azpi-atalean, Whittle metodoaren bidez eskuratutako *Attained Service dependent Potential Improvement MOS* (*ASPIM* [23]) politika azaltzen da.

2.1. GM [22]

GM proposamena Gittins metodoa erabilita ondorioztatu da. *GM QoE-aware* den eta fluxu tamainan oinarrituta dagoen planifikazio indize-

erregela bat da. Horren indizearen balioa eskuratutako zerbitzuaren menpekota den uneko bukatze-probabilitatearen eta atzerapenaren menpekota den MOS funtzio normalizatuaren arteko biderkadura da. Hortaz, QoE-aware politika horrek estatistikoki bukatzeko gertuago dauden fluxuei eta QoE degradazio gehiegirik jasan ez dutenei lehentasuna ematearen arteko oreka bilatzen du.

Horrez gain, lortutako konputazionalki tratagarria den adierazpenak, proposatutako indize-erregelaren inplementazio arina ahalbidetzen du edozein planifikazio logikatan.

2.2. ASPIM [23]

Beste alde batetik, kanal aldakorrean QoE-aware planifikazio proposamenari dagokionez, ASPIM erregela hori lortzeko Whittle metodoa erabili da.

ASPIM diziplina QoE-aware den, channel-aware den eta fluxu tamainan oinarritzen den indize-erregela tratagarria da. Kanal aldakorrerako lortutako QoE-aware diziplina horrek kanal onenean dauden eta kalitate subjektiboan saturaturik ez dauden erabiltzaileak lehenesten ditu. Kanal baldintza kondizio onenean ASPIM indizea kanal konstanterako proposatutako GM indizearen baliokidea da. Gainontzeko kanaletan, berriz, indizearen balioa uneko bukatze-probabilitatearen eta MOS funtzioaren arteko biderkadura eta bukatze-probabilitatearen hobekuntzaren arteko ratioa da. Bukatze-probabilitatearen hobekuntza kanal-egoera probabilitateen menpekota da.

3. ERRENDIMENDUAREN ANALISIA

Atal honetan proposatutako QoE-aware indize-erregelen errendimenduaren azterketa egiteari ekingo zaio. Horretarako, planifikazio-proposamenen errendimendua planifikazio-estrategia ospetsuekin alderatuko da simulazioen bitartez.

3.1. Simulazioen ezaugarriak

Azpi-atal honetan GM eta ASPIM planifikazio estrategien portaera aztertu eta erkatzeko egindako simulazioen parametro nagusiak aurkezten dira.

Aztertuko den konfigurazioak, benetako LTE wireless sare bateko agertokia islatzen du. Horretarako, sistema mailako irrati-sarbidetako simulagailu batetik [25] eskuratutako Kanalaren Kalitate Adierazle (CQI, *Channel Quality Indicator*) trazarak erabili dira. CQI txosten hauek tresna mu-

gikorretatik oinarri-estaziora bidaltzen dira, oinarri-estazioan dagoen planifikatzaileak erabiltzaile bakoitzaren kanal kapazitatea zein den jakiteko. Irrati-zelulan 5 km/h abiaduran mugitzen diren erabiltzaileak hartzen dira kontuan. Kasu horretan, kanalaren propagazioa Extended Pedestrian A ereduaren bidez definitzen da. Gaur egungo LTE bezalako wireless teknologietan gertatzen den bezala, hamasei kanal-egoera erabiltzen dira. CQI horiei dagozkien transmisio-abiadurak, r , eta kanal-egoera probabilitateak, q , 1. taulan azaltzen dira. CQI altuenak ez dira aurkezten, haien egoera probabilitatea oso txikia baita.

1. taula. CQI bakoitzeko transmisio-abiadurak (r) eta kanal-egoera probabilitateak (q).

CQI	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
r (Mbps)	0	4,2	6,72	8,4	11,25	16,8	21,84	25,2	26,88	33,6	44,68	50,4
q	0,28	0,12	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,01

Planifikatzaileari dagokionez, erabiltzaile bakarra zerbitzatzeko planifikazio-erabakiak 1 ms-an behin egingo dira. Behean, QoE-aware indize-erregelez aparte, simulazioetan erabiliko diren planifikazio-algoritmoen deskribapena aurkezten da:

- Max Rate (MR) [15]: Channel-aware politika hau une bakoitzean aldiuneko kanal-kapazitate altuena duen erabiltzailea zerbitzatzean dantz, sarearen transmisio tasa maximizatzeko asmoz.
- Proportional Fair (PF) [15]: Opportunistic motako diziplina honek aldiuneko transmisio tasa eta eskuratutako transmisio tasaren arteko ratio altuena duen erabiltzailea aukeratzen du.

Bestetik, berdinketak egotekotan, berdinketa haustea ausazko eran egingo da.

Bestalde, aztergai den agertoki honetan, fluxu-tamainan eta QoE ezaugarrian desberdintzen diren bi erabiltzaile klase aztertzen kontsideratzen dira. Sistemako trafiko fluxuei erreferentzia eginez, simulazioetan erabilitako fluxu tamaina banaketa Pareto da, klase bakoitzaren batez besteko tamainak 5 Mbit eta 50 Mbit izanik. Tamaina horiek gaur egungo haririk gabeko sareetan erabiltzen dira. QoE-ari dagokionez, lehenengo klasea QoE-an zorrotzagoa da, atzerapenaren behe eta goi atalaseak honakoak izanik: lehenengoarenak, 0,5 s eta 5 s, eta bigarrenarenak, berriz, 5 s eta 30 s. Kalitarearen degradazio tarterako funtzio logaritmikoa erabiltzen da.

Bestalde, planifikazio estrategien portaera sare-kondizio ezberdinetan aztertzeko asmoz sare-kondizio ezberdinak aztertuko dira. Ikasketa honetan zazpi sare egoera dira: karga baxua ($Q = 0,25; 0,375$), karga ertaina ($Q = 0,5; 0,75$) eta karga altua ($Q = 0,85; 0,9; 0,95$).

Sare baliabideen planifikaziorako sare-ingurunea Matlab erabilia inplementatu da. Planifikazio-diziplina eta sare-karga konbinazio bakoitzeko, 10.000 simulazio segundoko iraupena duten 10 simulazio txanda egingo dira. Txanda horiek ausaz sortutako tamaina zein heldueratan desberdintzen dira.

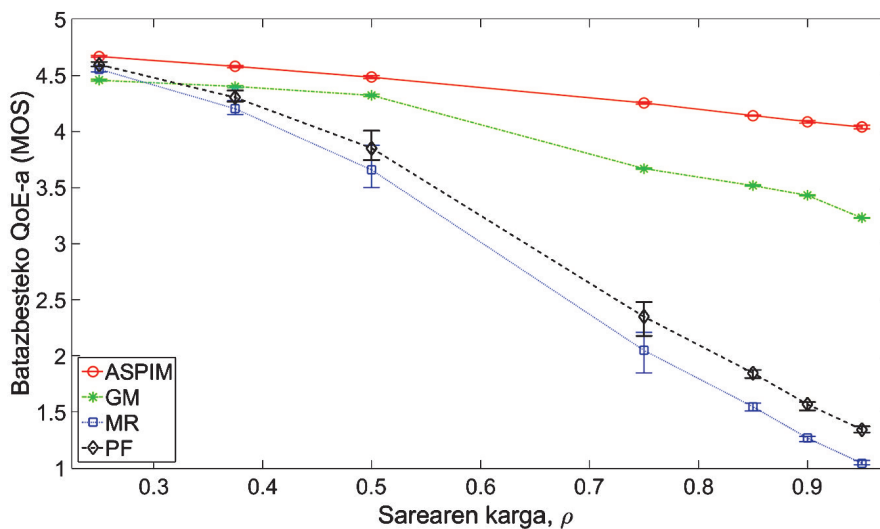
Gisa honetan, aztergai den metrika bakoitzaren batez besteko balioa 10 txandadun simulazio multzoan lortutako metriken batezbestekoa izango da guztirako. MOS lagin kopurua mugatuta dagoenez, aztertutako metrika bakoitzerako arentzat %95eko konfidantza tartek kalkulatu dira T-test-aren bidez. Molde honetan, errendimenduaren azterketarako irudietan metrika horiei dagozkien %95eko konfidantza tartek sartuko dira.

3.2. **Emaitzak**

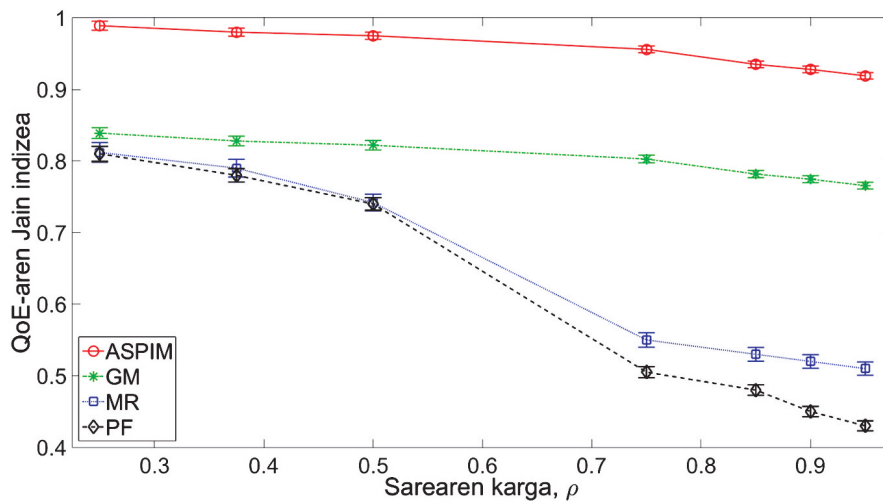
GM eta ASPIM indize-erregelak batez besteko MOS-a maximizatzeko helburuarekin proposatu dira, eta beraz, azterketarako errendimendu-metrika nagusia batez besteko MOS-a izango da. Gainera, batez besteko MOS-a azterteaz gain aparte, planifikazio-politiken ekitatea ikertuko da QoE-n. Ekitate neurri bezala MOS-aren Jain indizea [26] erabiliko da. Indize horren balioa 0tik 1erako tartean dabil, eta zenbat eta batetik gertuago, orduan eta justuago bidezkoagoa politika metrika horrekiko.

Batez besteko QoE-aren emaitzak 1. irudian biltzen dira. Ikus daitekeenez, ASPIM-en eta GM-en arteko aldea nabarmentzekoa da, bereziki Q altuentzat. Gainera, sare-karga altuenerako ere ASPIM-ek lortutako balioak 4-ren gainetik mantentzen dira. Horrez gain, MR-en eta PF-en batez besteko MOS-ak biziki baxuagoak dira.

2. irudian laburbiltzen dira QoE-aren ekitateari dagozkion emaitzak. ASPIM-ek ekitate maila egokiak lortzen ditu, MOS-aren Jain indizearen balioak 0,9ren gainetik mantentzen direlarik. GM-erako aldea 0,1 baino altuagoa da. Era berean, QoE-aren ekitatean, MR eta PF nabarmen-okerragoak dira.



1. irudia. Batez besteko QoE-aren emaitzak.



2. irudia. QoE-aren ekitatearen emaitzak: MOS-aren Jain indizea.

4. ONDORIOAK

Lan honetan QoE-aren optimizaziorako proposatuko GM eta ASPIM planifikazio indize-erregelak konparatzeari ekin zaio. Horretarako, lehenik

eta behin, bi QoE-aware planifikazio politika horiek aurkeztu dira, eta ondoren, horien errendimendua analizatu da.

Egindako errendimenduaren azterketaren arabera, batez besteko QoE-ari dagokionez, ASPIM izan ezik, GM-ek gainontzeko diziplina guztiak gainditzen ditu, biak gogobetetze-atalasearen (MOS = 3) gainetik mantentzen direlarik. Gainera, ASPIM-en eta GM-en arteko aldea kasurik txarrenean 1 ingurukoa da. QoE-aren ekitateari erreferentzia eginez, bi diziplinen Jain indizeen arteko diferentzia kasurik txarrenean 0,15 ingurukoa da. Horretaz gain aparte, GM-ek PF eta MR beti nabarmenki irabazten ditu.

Beraz, esan daiteke GM dela bigarren aukerarik onena QoE-an, eta antza denez, bi QoE-aware politiken QoE metriken aldea ikusita, atzerape-naren menpekoea den MOS funtzio horren eragina batez besteko MOS-ean oso altua da, ASPIM-en azaltzen diren kanal-egoera probabilitateek baino pisu gehiago duelarik.

Aitzitik, ASPIM indize-erregela GM indize-erregela baino konple-xuagoa da, GM-en inplementazioa errazagoa zein exekuzio-denbora az-karragoa direlarik. Batetik, GM indize-erregela berehalakoa da, hau da, ASPIM-en ez bezala, indizeen kalkulurako ez da erregelaren kanal-egoera onenerako baldintzarik egiaztatzen. Simulazioetan behatzen denaren ara-bera, exekuzio-denborari dagokionez, GM ASPIM baino 16 aldiz arinagoa da gutxi gorabehera.

Bestetik, GM-en kasuan indize bakoitzaren bukatze-probabilitate ho-bekuntzarako batukaririk ez da erabiltzen. Horrez gain, ASPIM indizearen kalkulurako kanal-egoera probabilitateak behar izateak aldeztu aurretik ka-nala modelaturik egotea eskatzen du.

Hortaz, lortu nahi den QoE-aren maximizazioaren zehaztasunaren eta indize-erregelaren konplexutasunaren arteko oreka bilatuko da ASPIM edo GM aukeratzekoan.

5. ESKER ONAK

Artikulu honek Espainiako Ekonomia eta Lehiakortasun Ministerioaren (MINECO) diru-laguntza jaso du, TEC2013-46766-R: QoEverage-«QoE-aware optimization mechanisms for next generation networks and services» proiektuaren bidez.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] 3GPP. 2010. «TS-123107 v9.0.0. Quality of Service (QoS) concept and architecture».

- [2] ITU-T. 2004. «Quality of Service and network performance».
- [3] PUTERMAN M.L. 1990. «Markov decision processes». *Handbooks in Operations Research and Management Science*, **2**, 331-434.
- [4] AL-ZUBAIDY H., LAMBADARIS I. eta VINIOTIS Y. 2012. «Optimal scheduling in multi-server queues with random connectivity and retransmissions». *Computer Communications*, **35**, 1626-1638.
- [5] PAPANITRIOU C.H. eta TSITSIKLIS J.N. 1987. «The complexity of Markov decision processes». *Mathematics of operations research*, **12**, 441-450.
- [6] CHEN H., CHENG C.C., CHUNG W.H. eta YEH H.H. 2012. «A reduced dimension MDP-based call admission control scheme for next generation telecommunications». *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 984-989.
- [7] BOLIA N. eta KULKARNI V. 2009. «Index policies for resource allocation in wireless networks». *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **58**, 1823-1835.
- [8] JACKO P. 2011. «Optimal index rules for single resource allocation to stochastic dynamic competitors». In *Proceedings of the 5th International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*, 425-433.
- [9] KLEINROCK L. 1976. *Queueing Systems. Volume 2: Computer Applications*. John Wiley&Sons.
- [10] AVRACHENKOVT K., AYESTA U., BROWN P. eta NYBERG E. 2004. «Differentiation between short and long TCP flows: Predictability of the response time». *IEEE INFOCOM*, **2**, 762-773.
- [11] AALTO S. eta AYESTA U. 2008. «Optimal scheduling of jobs with a DHR tail in the M/G/1 queue». *Proceedings of the 3rd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*, 50.
- [12] GITTINS J.C. 1979. «Bandit processes and dynamic allocation indices». *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 148-177.
- [13] AALTO S., AYESTA U. eta RIGHTER R. 2011. «Properties of the Gittins index with application to optimal scheduling». *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, **25**, 69-288.
- [14] ASADI A. eta MANCUSO V. 2013. «A Survey on Opportunistic Scheduling in Wireless Communications». *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **15**, 1671-1688.
- [15] AALTO S. eta LASSILA P. 2010. «Flow-level stability and performance of channel-aware priority-based schedulers». *IEEE Next Generation Internet (NGI)*, 1-8.
- [16] AYESTA U., ERAUSQUIN M. eta JACKO P. 2010. «A modeling framework for optimizing the flow-level scheduling with time-varying channels». *Performance Evaluation*, **67**, 1014-1029.
- [17] TABOADA I., JACKO P., AYESTA U. eta LIBERAL F. 2014. «Opportunistic Scheduling of Flows with General Size Distribution in Wireless Time-Varying Channels». *26th International Teletraffic Conference (ITC)*.

- [18] TABOADA I., LIBERAL F. eta JACKO P. 2014. «An Opportunistic and Non-Anticipating Size-Aware Scheduling Proposal for Mean Holding Cost Minimization in Time-Varying Channels». *Performance Evaluation*, **79**, 90-103.
- [19] WHITTLE P. 1988. «Restless bandits: Activity allocation in a changing world». A Celebration of Applied Probability, J. Gani (Ed.), *Journal of Applied Probability*, **25A**, 287-298.
- [20] GITTINS J., GLAZEBROOK K. eta WEBER R. 2011. *Multi-armed bandit allocation indices*. John Wiley & Sons.
- [21] ITU-T. 2007. «P.10/G.100 (2006) Amendment 1 (01/07): New Appendix I – definition of Quality of Experience (QoE)».
- [22] TABOADA I., LIBERAL F., FAJARDO J.O. eta AYESTA U. 2013. «QoE-aware optimization of multimedia flow scheduling». *Computer Communications*, **36**, 1629-1638.
- [23] TABOADA I. eta LIBERAL F. 2014. «A Novel Scheduling Index Rule Proposal for QoE Maximization in Wireless Networks», *Abstract and Applied Analysis*, **2014**.
- [24] WIERMAN A. 2011. «Fairness and scheduling in single server queues». *Surveys in Operations Research and Management Science*, **16**, 39-48.
- [25] BERGSTRA J.A. eta MIDDELBURG C.A. 2003. «ITU-T Recommendation G. 107: The E-Model, a computational model for use in transmission planning».
- [26] FIEDLER M., HOSSFELD T. eta TRAN-GIA P. 2010. «A generic quantitative relationship between Quality of Experience and Quality of Service». *IEEE Network*, **24**, 36-41.
- [27] IKUNO J.C., WRULICH M. eta RUPP M. 2010. «System level simulation of LTE networks». *IEEE 71st Vehicular Technology Conference*.
- [28] JAIN R., D. CHIU D. eta HAWE W.R. 1984. «A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system». *Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation*.