

Mauri Kinnunen

# **PILVILASKENTA 5G-AIKAKAUDELLA**



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA  
2020

## TIIVISTELMÄ

Kinnunen, Mauri  
Pilvilaskenta 5G-aikakaudella  
Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2020, 43 s.  
Tietojärjestelmätiede, kandidaatintutkielma  
Ohjaaja(t): Räisänen, Jaana

Tämän kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena, on tehdä yleiskatsaus siitä, millaista pilvilaskenta tulee olemaan viidennen sukupolven aikana telekommunikaatiossa. Kaikki alkaa siitä, miten lyhenne "5G" määritellään. Useilla akateemikoilla ja liike-elämän toimijoilla, on siitä erilaisia näkemyksiä. Tässä tutkielmassa syvennytään myös mahdollisiin 5G:n hyötyihin, sekä haasteisiin, joita sillä saattaa tulevaisuudessa olla. Kirjallisuuskatsauksen perusteella selviää, kuinka pilvilaskenta kehittyy sumu- tai reunalaskennaksi tulevaisuudessa, tai jopa tänä päivänä. Tämän ymmärtämiseksi, on oleellista suurin piirtein tietää, millainen on pilviradioliityntäverkon (C-RAN) arkkitehtuuri, ja millaisia heterogeeniset tietoverkot ylipäättään ovat. Tutkielman viimeinen osa kertoo multiyhteysreunalaskennan (MEC) paradigmasta, joka on useiden alueellisten foorumien ja projektien standardisointiprosessin tulos. Lisäksi, tutkielman lopussa on tehty synteisiä tutkimusprosessin tuloksista ja johtopäätöksistä.

Asiasanat: 5G, telekommunikaatio, C-RAN, pilvilaskenta, sumulaskenta, reunalaskenta, MEC...

## ABSTRACT

Kinnunen, Mauri  
Cloud Computing in the 5G-era  
Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2020, 43 pp.  
Information systems science, Bachelor's thesis  
Supervisor(s): Räisänen, Jaana

The main purpose, of this literature review, is to make an overview of cloud computing, in the fifth generation-era of telecommunications. It all starts from the definition of the abbreviation: "5G", which is a blend of various expressions, given by several academics and notables in the business. This survey also addresses the potential benefits of 5G, and the challenges it is possibly going to face in the future. During the journey, it turns out, how cloud computing evolves into fog, or edge computing, tomorrow, or even today. To understand, what this actually stands for, it is necessary, to also take a brief survey on the architecture, of the cloud-radio-access network (*C-RAN*), and heterogenous networks in general. The final part of this review, is about multi-access edge computing-paradigm (*MEC*), which is a result of standardization progress, done by various regional forums and projects. In addition, at the end of this thesis, a synthesis has been made of conclusions and results, found in the research progress.

Keywords: 5G, telecommunications, *C-RAN*, cloud computing, fog computing, edge computing, *MEC*...

# SISÄLLYS

|  |    |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ .....                                  | 2  |
| ABSTRACT .....                                     | 3  |
| SISÄLLYS.....                                      | 4  |
| KUVIOT .....                                       | 5  |
| TAULUKOT .....                                     | 5  |
| 1 JOHDANTO.....                                    | 6  |
| 2 VIIDENNEN SUKUPOLVEN DATAYHTEYS - 5G.....        | 8  |
| 3 5G:N MÄÄRITELMÄ .....                            | 10 |
| 3.1 5G-tietoverkon ominaisuuksia.....              | 12 |
| 3.2 Datamäärän kasvu 5G:n haasteena .....          | 13 |
| 3.3 Energiankulutus.....                           | 14 |
| 4 PILVILASKENTA (CC) .....                         | 15 |
| 4.1 Mobiilipilvilaskenta (MCC).....                | 17 |
| 5 KESKITETTY PILVIRADIOLIITYNTÄVERKKO (C-RAN)..... | 20 |
| 5.1 Heterogeeniset tietoverkot .....               | 23 |
| 6 SUMULASKENTA (FC) .....                          | 25 |
| 7 REUNALASKENTA (EC) .....                         | 28 |
| 7.1 Standardisointi - ETSI MEC ISG .....           | 30 |
| 7.2 Multiyhteysreunalaskenta (MEC) .....           | 31 |
| 8 YHTEENVETO .....                                 | 35 |
| LÄHTEET .....                                      | 38 |

## KUVIOT

|   |    |
|---|----|
| KUVIO 1. Pilvilaskennan rakenne .....       | 17 |
| KUVIO 2. Sumu-pilvi-systeemin rakenne ..... | 26 |
| KUVIO 3. H-CRAN MEC-arkkitehtuuri .....     | 34 |

## TAULUKOT

|  |    |
|--|----|
| TAULUKKO 1. "Pilvilaskenta 5G-aikakaudella" -kirjallisuuskatsauksen synteesiä, SWOT-analyysia mukailleen ..... | 37 |
|--|----|

# 1 Johdanto

Tämän kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on selvittää, millaista pilvilaskenta on modernin 5G-teknologian aikakaudella. Aihetta on syytä tutkia, koska se on äärimmäisen ajankohtainen. Päästäkseen alkuun tässä prosessissa, on ymmärrettävä, mitä tarkoittavat käsitteet: "5G" ja "pilvilaskenta". Näitä termejä pyritään avaamaan pilvilaskennan käyttäjien, kehittäjien ja tarjoajien näkökulmista. Samaan aikaan, pyritään kiinnittämään huomiota siihen, mitä hyötyjä ja haasteita 5G-aikakausi tuo tullessaan.

Tutkimusmenetelmänä on systemaattinen kirjallisuuskatsaus. Sen apuna on käytetty Okolin ja Schabramin (2010), kahdeksan askeleen ohjetta systemaattisen kirjallisuuskatsauksen tekemiseen. Ennen varsinaista kirjoitustyötä, tiedonhakuprosessin aikana, on ollut oleellista ymmärtää, mikä on tutkimuksen tarkoitus, ja mitkä ovat tutkimuksen tavoitteet. Lähdemateriaalin etsimiseen on käytetty JYKDOK:sta löytyviä informaatioteknologian tieteellisiä artikkeleja sisältäviä tietokantoja kuten: *ACM Digital Library*, *IEEE Xplore* ja *AIS eLibrary*. Lisäksi tietoa on haettu tarvittaessa myös muista tunnetuista tieteellisistä tietokannoista, kuten: *Science Direct*, *Web of Science*, *Scopus* ja *Google Scholar*. Koko tutkielman tekoprosessin ajan, lähdemateriaalin luotettavuutta on pyritty tarkastelemaan akateemisesti, kriittisesti ja analyttisesti, mm. vertaisarvioimalla lähdemateriaalina käytettyjä artikkeleja.

Tietoa on haettu ainoastaan englannin kielellä, mutta sitä on käännetty suomen kielelle. Käännöstyön apuvälineenä on käytetty *sanakirja.org*-verkkopalvelua, *MOT*-sanakirjaa, sekä *Keysight Technologies*:n listaa 5G-aiheisista termeistä ja akronyyeistä. Tietoa on peilattu Jyväskylän Yliopiston Informaatioteknologian tiedekunnassa tehtyyn aikaisempaan tietojärjestelmätieteen tutkimukseen, ja siltä pohjalta tässä tutkielmassa on myös käytetty joi-tain vapaita suomennoksia. Tavoitteena on ollut tehdä tieteellisestä tekstistä mahdollisimman helposti ymmärrettävää, ja sen vuoksi tekstin sisällä on avattu samoja lyhenteitä useita kertoja. Tämä johtuu myös osittain siitä syystä, että tutkimuksen aihealueeseen liittyy tavallista enemmän lyhenteitä ja sanoja, joille ei ole vielä olemassa virallisia suomennoksia. Myös Websterin & Watsonin (2002) mukaan tietojärjestelmätiede on tieteenalana varsin nuori.

On yleisesti tiedossa, että tietotekniikka ja internet kehittyvät nopealla tahdilla, sen vuoksi tämän tutkielman tiedonhakuprosessissa ei ole etsitty kaikista viitatuimpia (engl. *most cited*) artikkeleja, vaan enemmänkin aihealueeltaan tutkimusaiheeseen liittyviä, relevantteja ja ajankohtaisia julkaisuja. Käytettyjä hakusanoja olivat: "5G", "cloud", "computing", "telecommunication" ja niiden yhdistelmiä. Kuvien piirtämisessä on hyödynnetty *Microsoft Powerpoint*:ia ja siinä olevaa ikonikirjastoa. Lähdetiedot on merkitty *American Psychological Association/APA*-viittausformaatin mukaisesti. Niiden merkitsemisessä on käytetty apuna *Refworks*:n *Write-n-Cite*-lisäosaa *Microsoft Word*:ssa.

Vaikka kyseessä on akateeminen tutkimus, niin tutkimuksessa on käytetty esimerkkeinä joitain lähdemateriaalissa usein esiintyneitä, kaupallisia toimijoita, ja niiden esittelemiä standardimalleja. Tästä huolimatta tutkielmaa lukiessa, ei välttämättä kannata olettaa, että kaupallisten toimijoiden esittelemät ratkaisut olisivat ainoita ratkaisuja, olemassa oleviin ongelmiin. Akateemisen tutkimuksen ei ole myöskään tarkoitus vääristää markkinoiden kilpailutilannetta. Sen vuoksi tämän tutkielman sisällä, saattaa myös esiintyä eriäviä mielipiteitä, joistain aiheeseen liittyvistä yksityiskohdista.

Ajankäytöllisten resurssien rajallisuudesta johtuen, tutkielman ulkopuolelle on rajattu ainakin *RANaaS*-paradigma (engl. *Radio-Access-Network as a Service*). Myös 5G-verkon tietoturvallisuudesta ja liiketaloudellisista vaikutuksista, olisi varmasti löytynyt enemmänkin tietoa. Tämä tutkimus on tehty täysin tietojärjestelmätieteen näkökulmasta. Näin ollen, siinä ei oteta lainkaan kantaa myöskään esimerkiksi siihen, onko 5G-verkossa liikkuvilla signaaleilla mahdollisia terveysvaikutuksia (*Does 5G pose health risks? BBC-News 7/2019*). Tai siihen, onko 5G-mastoilla ja koronaviruksen leviämällä jokin yhteys (*5G-mastojen tuhoaminen levisi Ruotsiin, Iltalehti 4/2020*). Näillä sanoilla on tarkoitus kannustaa, kriittisen ja analyttisen otteen säilyttämiseen, myös silloin, kun joku lukee tätä kirjallisuuskatsausta.

## 2 Viidennen sukupolven datayhteys - 5G

Viidennen sukupolven datayhteyttä (5G) on ylistetty neljänneksi teolliseksi valankumoukseksi. Vaikka kansainväliset taloudelliset ongelmat ja yhteiskunnalliset haasteet, kuten COVID-19-pandemia, ovat hidastaneet 5G-tietoverkkojen ja -palvelujen kehitystyötä, niin ajan mittaan niistä tulee tärkeä voima "uudessa normaalissa" toiminnassa (Shim, Van den Dam, Aiello, Penttinen, Sharda & French, 2020). Vuosi 2019 jäi historiaan aikakautena, jolloin viidennen sukupolven langattomat tietoverkot saapuivat. Informaatioteknologian ja internetin vikkellä kehitys asettaa 5G-teknologialle monimuotoisia haasteita, verrattuna aikaisempien sukupolvien telekommunikaatioon (Liu, Peng, Shou, Chen & Chen, 2020). Erityisesti pilvipohjaisesta viitekehyksestä (engl. *framework*) on tulossa äärimmäisen suosittu, koska se mahdollistaa helpon ja nopean pääsyn 5G-verkkojen läpi, pilvipalveluissa olevaan dataan (Rad, Diaby & Rana, 2017).

Tällä hetkellä työn alla on saada 5G-teknologia tukemaan, media- ja viihdesovellusten suoratoistoa *Ultra-HD*-laadulla (engl. *Ultra-High-Definition*). *Cisco Visual Networking Index*:n mukaan vuonna 2020 palvelimille siirretään 7 biljoonaa videoklippää, mikä vastaa 2,5 päivittäistä videoklippää jokaista ihmistä kohden. Tämä tarkoittaa sitä, että mediapalvelut kuluttavat paljon laskentatehoa ja verkkoresursseja, koska myös syötteen laatu (engl. *Quality of Service/QoS*) on korkeatasoista. (Alvarez, Breitgand ym., 2019.)

Nykyaikana tietojenkäsittelyä tapahtuu kaikkialla. Yksilöt ja organisaatiot ovat laajalti omaksuneet esineiden internetin (engl. *Internet of Things*) ja suuren datamäärän analytiikan (engl. *Big data*). 5G-datayhteys on niiden kanssa eturintamassa mobiiliteknologian kehityksessä (French & Shim, 2016). 5G-verkot ja -palvelut tulevat kasvattamaan tietoliikenteen määrää, tiedon varastointiin tarvittavaa muistitilaa, ja prosessointiin tarvittavaa laskentatehoa eksponentiaalisesti. Samaan aikaan etäkäyttöiset älylaitteet mahdollistavat pääsyn pilvilaskennallisiin resursseihin (Lopez-Pires & Barán, 2018).



Tällä hetkellä on käynnissä globaali keskustelu siitä, miten tulevaisuuden 5G-tietoverkot määritellään. On olemassa yleinen konsensus, että 5G tulee edelleen edistymään, kun yhä monimuotoisempia mobiilipalveluita otetaan käyttöön. Myös langattomien laitteiden määrä ja kompleksisuus tulee kasvamaan. Lisäksi laitteiden tulee olla käytettävissä kaikkialla. Niitä eivät operoi enää pelkästään ihmiset, vaan myös täysin automatisoidut laitteet voivat kommunikoida keskenään (engl. *Machine-to-Machine*). (Rost, Bernardos ym., 2014.)

Pilviresurssien ja verkkopalvelujen virtualisointi (engl. *virtualization*) ja joustava skaalaus (engl. *flexible scaling*) sekä tietoverkon ytimessä (engl. *core*), - että tietoverkon reunalla (engl. *edge*), tulevat olemaan avainasemassa ylimääräisten operationaalisten kulujen (*OPEX*) minimoinnissa. Ne tulevat myös vähentämään markkinointiaikaa ja vähentämään rahallisia kustannuksia (*CAPEX*) (Alvarez ym., 2019).

On yleisesti tiedossa, että internet voi vauhdittaa taloudellista kasvua, mahdollistaa pääsyn informaatioon, ja helpottaa ihmisten välistä vuorovaikutusta. Valitettavasti, miljardeilla ihmisillä ei ole mahdollisuutta päästä internetiin. Arviolta 4 miljardia ihmistä - 56% maailman väestöstä on edelleen ilman internetyhteyttä (Onireti, Qadir, Imran & Sathiaseelan, 2016). Vaikka suurimassa osassa maailman maista 4G-infrastruktuurin käyttöönotto on vielä kesken, niin 5G:en liittyvistä aiheista keskustellaan laajasti ja yleisö tiedostaa, että on olemassa paljon tehokkaampaa teknologiaa, kuin neljännen sukupolven teknologia, eli 4G (Suryanegara, Arifin & Asvial, 2017). Useat johtavat akatemian ja elinkeinoelämän julkaisut, kuten *Deloitte Review*, *MIS Quarterly*, *Communications of the ACM* ja *Information Systems Research* ovatkin julkistaneet erikoispainoksia 5G:en liittyen (French & Shim, 2016).

CISCO:n laskelmien mukaan langattomien laitteiden määrä ylitti maapallon populaation vuonna 2014 (Sultan & Ali, 2017). *Qualcomm* on arvioinut että 25 miljardia laitetta on yhdistettynä vuoden 2020 loppuun mennessä (Zhang, Cheng, Gamage, Zhang, Mark & Shen, 2015). Tänä päivänä useat käyttäjät nauttivat siis internetin tarjoamista palveluista. Tämä on mahdollista pitkälti siitä syystä, että datan laskentaa, hallinnointia ja prosessointia varastoidaan pilvipalveluihin. Pilveä rajoittavien tekijöiden määrä kasvaa kuitenkin jatkuvasti, niitä ovat esimerkiksi tarve suurelle skaalautuvuudelle, laitteiden liikuttavuudelle (engl. *mobility*) ja matalemmalle viiveelle (engl. *latency*). Lisäksi 5G-mobiiliverkko vaatii laskennan älykästä ja reaaliaikaista suoritettavuutta. (Kitanov & Janevski, 2017.)

Kun 4G-teknologia otettiin käyttöön, Yhdysvallat valloitti uudelleen johtoaseman mobiilimaailmassa. 2000-luvulla, Eurooppa, Japani ja Korea johtivat kolmannen sukupolven (3G) mobiilimaailmaa. Nyt kaikki maat kilpailevat siitä, kuka johtaa maailmaa 5G-teknologian aikana (French & Shim, 2016).

### 3 5G:n määritelmä

Tulevaisuuden tietoverkkoihin viitataan usein lyhenteellä 5G. On ennakoitu, että verkkoon yhdistettyjen laitteiden määrä tulee tuhatkertaistumaan. Silloin on selvää, että datamäärä 5G-verkoissa, tulee olemaan massiivinen ja monimuotoinen. Sellaisesta datamäärästä voidaan myös käyttää nimitystä *Big Data* (Sultan & Ali, 2017).

Matkapuhelinkommunikaatio on kokenut kehitysprosessin ensimmäisestä sukupolvesta (1G) - viidenteen sukupolveen (5G). Kun 1G syntyi vuonna 1986, ihmiset omaksuivat tavan soittaa puheluita kävellessään. Kuitenkin, tuon ajan kommunikaatiosysteemi käytti analogisia signaaleja tiedonvälityksessä. Sen ajan ongelmia olivat esimerkiksi heikko äänenlaatu, signaalin epävakaas, huono kenttä, ja myös puhelut saattoivat yhdistyä vahingossa ristiin. Vuonna 1995 alettiin käyttää toisen sukupolven mobiiliyhteyttä. Digitaalisesti moduloitavan signaalin avulla kommunikaatiosta tuli varmempaa, ja myös äänen laatu parani. 3G-verkosta tuli todellisuutta vuonna 2008. 3G on kasvattanut käyttäjämäärää reilusti, ja verkon toiminta on nopeutunut. Sen pohjalta on syntynyt useita matkapuhelinsovelluksia, jotka toimivat internetissä. Kun 3G oli ollut kaupallisessa käytössä neljä vuotta, saapui 4G teknologia. Vielä nopeampi tiedonvälitys mahdollisti reaaliaikaisen viestittelyn, videoiden katselun mobiililaitteilla sekä mahdollisti mm. kulkuneuvojen yhdistämisen internetiin. Kaikkien aiempien mobiilikommunikaatiosukupolvien jälkeen 5G on tulossa ottamaan seuraavan askeleen. (Wang, 2020.)

Kun siirrytään kohti viidennen sukupolven tekniikkaa, niin kehityskulku suuntautuu yhä monimutkaisempaan ja älykkäämpään teknologiaan. 5G voidaan määritellä ohjelmistopohjaiseksi kommunikaatitietoverkkoarkkitehtuuriksi, joka on mahdollista ohjelmoida dynaamisesti, tarjoamaan tietyn sovelluksen vaatima komentokerros. Tämä tulee luomaan uusia ja monimuotoisia liiketoimintamahdollisuuksia (Rao & Prasad, 2018).

5G ei ole pelkästään teknologian rajapinta, joka tarjoaa käyttäjilleen korkeampia datamääriä, sekä suurempaa siirtonopeutta ja -kapasiteettia, vaan, se on systeemi, joka osaa mukautua palvelemaan monia erilaisia liiketoimintaan orientoituneita sovelluksia (Chen ym., 2015). Pää tavoitteina on kuitenkin paran-

taa luotettavuutta, energiatehokkuutta ja kapasiteettia. Samaan aikaan, yhteyden tiheys kasvaa ja viive lyhenee (Liu ym., 2020).

Vaikka ei ole olemassa konsensusta 5G:n olemuksesta, niin monilla liiketoiminnan johtohahmoilla on yhteisymmärrys, sen suorituskyvyn kriteereistä. Niitä ovat matala latenssi, suuri tietoverkon kattavuus, energiatehokkuus, massiivinen *MIMO* (engl. *Massive Multiple-In Multiple-Out*), matala energian kulutus, yhdistettyjen laitteiden suuri määrä, ja korkeatasoinen tietoturva (French & Shim, 2016).

5G on vielä tällä hetkellä varhaisessa vaiheessa. On olemassa joitain relevantteja dokumentteja, jotka määrittelevät 5G:n teknisiä ominaisuuksia. Tutkijoiden keskusteluissa on useita eri näkökulmia siihen, miten 5G-tietoverkko rakennetaan. On puhuttu esimerkiksi millimetriaalloista, energian kulutuksesta ja siitä, millainen on 5G-rajapinta. Monet tutkimukset keskittyvät teknisiin yksityiskohtiin, mutta koko globaali systeemi rakentuu niissä harvoin. Voidaan kuitenkin ennustaa, että 5G on mahdotonta määritellä tyypillisenä palveluna, tai yksittäisenä teknologiana. (Chen, Zhang, Hu, Taleb & Sheng, 2015.)

Monet maat kehittävät aktiivisesti 5G-tekniikoita aiemmin mainittujen tunnuspiirteiden mukaisesti. Esimerkiksi Kiinassa 5G on jo virallisesti kaupallisessa käytössä. Myös jotkut muut maat rakentavat aktiivisesti 5G-verkkoja, tiiviissä yhteistyössä suurien 5G-yritysten, kuten *Ericssonin* ja *Huawein* kanssa (Liu ym., 2020). 5G-tekniikan odotetaan luovan laajan kirjjon uudenlaisia palveluja, kuten teollisuuden automatisaatiota, droonisovelluksia, ja sensorien käyttöä laajennetussa todellisuudessa (engl. *Augmented Reality*) (Suryanegara ym., 2017). Lisäksi sen odotetaan luovan uusia mahdollisuuksia esineiden internetin, itseohjautuvien autojen, ja virtuaalisen todellisuuden (engl. *Virtual Reality*) saralla (Ding & Janssen, 2018).

Käytännön määritelmän mukaan 5G tarkoittaa 4G:n teknistä parantelua (Suryanegara ym., 2017). Suurin osa 4G-mobiiliverkoista pohjautuu *Third Generation Partnership Project (3GPP)* -standardeihin. Sen tietoverkkoarkkitehtuurin ja radioyhteyden perustana on käytetty *Long Term Evolution (LTE)* -teknologiaa. (Rost ym., 2014; Rao & Prasad, 2018).

5G:n kaupallisen käyttöönoton on odotettu alkavan vuonna 2020. Tutkimustyön tuloksena on alettu ymmärtää tulevaisuuden 5G-systeemin yksityiskohtaisempia vaatimuksia, ja kyetty erittelemään lupaavimpia teknisiä vaihtoehtoja. Vaikka 5G:n määritelmä voi sisältää useita eri standardisointirunkoja, 3GPP-standardi tulee todennäköisesti olemaan teknisten yksityiskohtien polttopisteessä (Wang, 2020). Liiketaloudellisista syistä johtuen, 5G-mobiilitietoverkkoarkkitehtuuria tullaan todennäköisesti kehittämään *LTE 12*-standardisointijulkaisun evoluutiona, ja siitä eteenpäin (Rost ym., 2014).

### 3.1 5G-tietoverkon ominaisuuksia

4G:n pohjalta, 5G on ottanut sarjan teknologisia kehitysaskelaita. Niihin kuuluvat: millimetriaaltokommunikaatio (*mmWave*), kehittynyt säteenmuodostus (engl. *advanced beamforming*), ultra-laajan skaalautuvuuden omaavat antennit (engl. *ultra-large-scale antenna*), kaksisuuntainen langattomuus (engl. *full-duplex wireless*) ja tiivistetty verkkoprosessointi (engl. *compressed network processing*). Millimetriaaltokommunikaatio mahdollistaa laajemman taajuusalueen, jolloin voidaan välttää yhteyden katkeaminen. Kehittynyt säteenmuodostus voi parantaa signaali-kohinasuhdetta. Kaksisuuntainen langattomuus mahdollistaa suuremman kaistanleveyden. Tiivistetty verkkoprosessointitekniologia voi vähentää latenssia merkittävästi. Näiden tekniikoiden johdosta 5G tekee eron 4G:en. 5G:n onnistunut käyttöönotto mahdollistaisi uudenlaisia sovelluksia, ja voisi tehostaa esimerkiksi video-chattia, esineiden internetiä sekä ridesharingia. (Wang, 2020.)

*Radio-IP*-kapasiteetti tulee kasvamaan sektorikohtaisesti jopa 20 Gb/s suuruiseksi 5G-aikakaudella, kun AR/VR ja *Ultra-HD*-videokuva, joiden syötteen laatu (QoS) on korkea, siirtyvät nopeammassa radioverkossa (Tran, Hajisami & Pompili, 2017). Verrattuna olemassa olevaan 4G-verkkoon, 5G-verkon energiatehokkuus pitäisi kasvaa kymmenkertaiseksi (Kitanov & Janevski, 2017).

5G:n ominaisuuksilla on potentiaali muuttaa koko mobiilikommunikaation merkitys, ja käynnistää teknologinen vallankumous digitaalisessa yhteiskunnassa. Niitä ovat ainakin :

- 10 Gb/s datamäärät, jotka mahdollistavat *Ultra-HD*-videon ja virtuaalisen todellisuuden sovellukset.
- 10-100 kertaa suurempi nopeus ja suurempi tallennuskapasiteetti, kuin tämän hetkissä 4G LTE-verkoissa, mahdollistaa verkkosivujen, videon ja muun datan vikkälämmän lataamisen mobiililaitteille. Se luo perustan lukuisille innovaatioille, kuten etäkirurgialle lääketieteessä, sekä itseohjautuville, ja törmäyksiä välttäville autoille liikenteessä.
  - Arviolta 1000-kertaa laajempi langattoman alueen kapasiteetti
  - Latenssi vähenee alle 1 mS.
  - Lisensoitujen ja lisensoimattomien palvelujen kirjo.
  - Jatkuva tekninen tuki, käyttäjäkokemuksen parantamiseksi.
  - Useita miljardeja sovelluksia ja satoja miljardeja koneita.
  - Energiankulutuksen yhtä bittiä kohden, pitäisi laskea kertoimella 1000, yhdistettyjen laitteiden akun keston parantamiseksi.
  - Tuki tietoverkon "viipaloinnille", joka antaa virtuaalisille verkkooperaattoreille mahdollisuuden määrittellä itsenäisesti omat verkkoarkkitehtuurinsa. Silloin skaalautuvien palveluiden käyttöönotosta tulee nopeampaa ja kustannukset ovat alhaisempia. (Rao & Prasad, 2018.)

### 3.2 Datamäärän kasvu 5G:n haasteena

Ekspontiaalinen dataliikenteen kasvu sävyttää kehityskulkua kohti viidennen sukupolven tietoverkkoja. Datamäärän kasvu johtuu käyttäjäterminaalien määrän noususta, rikkaammasta internetsisällöstä, suuremmista näyttöpäätteistä, ja tehokkaampien internet-laitteiden säännöllisestä käytöstä. Väliaikaisesti ja spatiaalisesti ruuhkautuvien dataliikennesysteemien, monimuotoisempien palveluiden, sekä käyttäjäterminaalien eriävien ominaispiirteiden vuoksi, tarve mobiiliverkkojen skaalattavuudelle lisääntyy. (Wubben, Rost, Bartelt, Lalam ym., 2014.)

Dataliikenteen määrässä on koettu eksponentiaalinen kasvu, joka melkein kaksinkertaistuu joka vuosi. *Cisco Visual Networking Index (VNI)* ennakoi mobiilidataliikenteen kasvavan 61% vuositasolla, vuodesta 2013, vuoteen 2018 asti. Lisäksi on ennakoitu, että dataliikenteen määrä tulee tuhatkertaistumaan vuodesta 2010, vuoteen 2020 mennessä. Tämä ilmiö tunnetaan myös nimellä: *1000x Data Challenge* (Zhang ym., 2015).

Päivittäisen dataliikenteen määrän odotetaan olevan länsi-Euroopassa, noin 12540 terabittiä (TB) vuonna 2020. Maailmanlaajuinen kokonaisdatamäärä (noin. 351 eksabittiä/EB), vuonna 2025, tarkoittaa 174-kertaista kasvua, vuoteen 2020 verrattuna. Nykyiset matkapuhelinverkot, eli 1G, 2G, 3G ja 4G, ovat kaukana siitä, että ne kykenisivät tyydyttämään merkittävän datamäärän kasvun asettaman vaatimuksen. Nykyaikaiset tukiasemat kuluttavat myös paljon energiaa, silloin kun yhteys katkeaa. Tästä seuraa taas häiriöitä muille käyttäjille ja niin edelleen. (Peng, Li, Zhao & Wang, 2015.)

*Fifth Generation Public Private Partnership (5G-PPP)*:n mukaan, 5G tulee yhdistämään noin 7 biljoonaa langatonta laitetta tai esinettä, ja tiputtamaan keskimääräisen palvelunluontiajan, 90 tunnista, 90 minuuttiin. Samaan aikaan, myös kehittyneen, ja käyttäjän hallinnoiman tietoturvan käyttö mahdollistuu. 5G:n tavoite on digitaalinen yhteiskunta, jossa tarvitaan korkeaa palvelujen saatavuutta ja tietoturvaa. Silloin pilvilaskennasta, sovellusten määrittelemästä tietoverkosta (engl. *Software Defined Network/SDN*) ja tietoverkon funktioiden virtualisoinnista (engl. *Network Functions Virtualization/NFV*) tulee olemaan hyötyä. (Ahmad, Kumar, Liyanage, Okwuibe, Ylianttila & Gurtov, 2018.)

Operaattoreiden täytyy jatkuvasti päivittää langattomia tietoverkkojaan kapasiteteetin kasvattamiseksi. Tämä johtaa käytännössä teknisten ongelmien määrän kasvuun. Silloin investoinnit ja operationaaliset kustannukset saattavat olla suurempia, kuin palvelun tekemä tuotto. Myös teollisuus valmistautuu ottamaan käyttöön 5G-tietoverkot. Se asettaa omalta osaltaan lisää haasteita tulevaisuuden langattomien palveluiden luotettavuudelle, energiankulutukselle, tietoturvalle jne. Tavallisiin tietoverkkoihin verrattuna, hintojen ja ongelmien kompleksisuuden, odotetaankin kasvavan räjähdysmäisesti 5G-aikakaudella. (Houatra & Tseng, 2018.)

5G-tietoverkon toimivuuden kannalta, myös tietoturva on suuri huolenaihe. Erityisesti operaattorikäyttöisen, kokonaisvaltaisen salauksen rooli, on

herättänyt paljon keskustelua pilvipalvelujen tarjoajien (kuten *Google*, *Amazon*), internetpalvelujen tuottajien (kuten *KPN*, *T-Mobile*), laitteiden toimittajien (kuten *Nokia*, *Ericsson*) ja standardisointiosastojen (kuten *IETF*, *ETSI*) keskuudessa (Wang, 2020).

Edellä mainittujen haasteiden voittamiseksi 5G-verkossa, kehittyneitä radioliityntäteknologioita ja *IP*-avoimia (engl. *all-Internet Protocol open*) tietoverkkoarkkitehtuureja tulisi kehittää kitkattomasti yhteensopiviksi 4G-systeemien kanssa (Peng ym., 2015).

### 3.3 Energiankulutus

Energiankulutus on suuri haaste tulevien sukupolvien tietoverkoissa, koska funktionaalisia solmukohtia on paljon (Rad ym., 2017). Useista ympäristöllisistä ja ekonomisista tekijöistä johtuen, virransäästöllä on erittäin tärkeä merkitys, kun matkapuhelinverkkoja kehitetään. Radioliityntäverkko (*RAN*) tulee kuluttamaan jopa 30% koko mobiilikommunikaation hiilijalanjäljestä, vuonna 2020 (Das, Bapat & Das, 2019).

Energiaa täytyy kuluttaa hyödyllisesti, vaikka saman aikaisesti suorituskyky on korkealla tasolla. Pilviavusteinen, pienten laskentasolujen koordinoitumismekanismi on tästä syystä välttämätön. Sen avulla voidaan määrittää, milloin laskentasolu on aktiivinen, ja milloin ei. Silloin tietoliikennettä voidaan tasapainottaa reaaliaikaisesti (Zhang ym., 2015). Energiankulutuksen näkökulmasta, laskentasolu tai pilvenhattara (engl. *cloudlet*) toimii päätöksentekokohtana, kun mobiilipilvipalveluita suoritetaan. Älylaitteiden pieni fyysinen koko ja paino, sekä niiden liikutettavuus, asettavat rajoitteita niiden akun kestolle ja laskentaresursseille. Kun laskentaa vaativia tehtäviä puretaan pilvipalveluihin, säästyy laskentatehoa, ja siten myös energiaa (Sarvabhatla, Konda, Vorugunti, & Babu, 2017).

Kun pilvi- ja sumulaskentapalvelujen (Sumulaskenta määritellään tarkemmin tämän tutkielman myöhemmissä osissa) laatua 5G-verkossa arvioitiin energiatehokkuuden näkökulmasta, niin tulokset osoittivat selvästi, että 5G tulee hyötymään suuresti, jos siihen implementoidaan, sekä pilvi-, että sumulaskentaympäristö. Tämä johtui siitä, että pilven- ja sumun sovituskonekannat toimivat tehokkaasti yhteistyössä, pienempää latenssia vaativien, korkeamman mobiliteetin- ja skaalautuvuuden omaavien, ja reaaliaikaiseen suorittamiseen kykenevien palveluiden kanssa, joita ollaan kehittämässä. (Kitanov & Janevski, 2017.)

Yhteenvedon, energiatehokkuus tulee olemaan tärkeä 5G:en liittyvä tutkimusaihe. Valmis pilviradioliityntäverkko (engl. *Cloud Radio Access Network/C-RAN*) voisi tarjota energiatehokkaan lisämahdollisuuden, koska taajuuskaistan prosessoinnin keskittäminen voi säästää energiaa. Erityisesti silloin, jos datakeskukset sitoutuvat toimimaan ilmastoystävällisesti (Andrews, Buzzi, Choi, Hanly, Lozano, Soong & Zhang, 2014).

## 4 Pilvilaskenta (CC)

Akateemikoilla ja suurilla informaatioteknologian yrityksillä on erilaisia määritelmiä pilvilaskennalle (engl. *Cloud Computing/CC*), ja monet määrittelevät pilvilaskennan eri näkökulmista. Almubaddelin & Elmogyn (2016) mukaan Pilvilaskenta on laskentapalvelujen välittämistä internetissä. Pilvipalvelut mahdollistavat ohjelmistojen ja laitteistojen käytön, yksilöille ja yrityksille. Kolmannet osapuolet hallinnoivat niitä etäyhteyden avulla. Pilvipalvelut ovat yhteisiä palveluita, joita johdetaan virtuaalisesti, ja ne ovat saatavilla internetin välityksellä (Almubaddel & Elmogy, 2016).

Pilvilaskenta on täysikasvuinen teknologia, joka mahdollistaa suuren laskentatehon, yltäkylläiset resurssit, jatkuvan käytettävyyden, helppokäyttöisyyden ja korkean suorituskyvyn. Saman aikaisesti, se vähentää ohjelmistojen ja laitteistojen hallinnointikuluja, sekä tarjoaa alustan monille erialisille sovelluksille. Esimerkiksi, suurin osa matkapuhelinsovelluksista perustuu pilvipalveluihin (Liu ym., 2020).

Pilvilaskenta helpottaa älylaitteiden, kuten *iPad*:n ja *iPhone*:n rajallista kykyä käsitellä resursseja, purkamalla laskennallista tehoa vaativia tehtäviä pilveen (Sarvabhatla ym., 2017). Pilvilaskennasta on tulossa jatkuvasti tärkeämpää nykyajan liiketaloudessa, koska se parantaa joustavuutta, skaalautuvuutta, sekä tietoturvaa, ja sen hinta on matala (Zhang ym., 2015).

Pilvilaskennan tarkoitus on tukea kaikkialla olevaa, helppokäyttöistä ja käyttötarkoituksesta riippuvaista internetyhteyttä, tekemällä laskentaresurssit, kuten tallennustilan, palvelimet, tietoverkot, sovellukset, ja yhteisessä varannossa olevat palvelut helposti muunneltaviksi. Näitä resursseja voidaan provioida ja julkaista ripeästi, vähentämällä palveluntarjoajan hallinnointiin, tai vuorovaikutukseen kuluttamaa vaivannäköä (Jiang, Li, Tian & Al-Nabhan, 2020).

Pilvilaskentaa käytetään laajalti, sen mahdollistamien hyötyjen vuoksi. Niitä ovat: matala hinta, helppo pääsy informaation luo, nopea käyttöönoton mahdollisuus, varmuuskopiointi, ja automaattinen sovellusten integraatio (Jiang ym., 2020). Vaikka pilvilaskenta tarjoaa suunnattomia mahdollisuuksia, liittyy siihen myös useita haasteita. Yksi tulevaisuuden 5G-tietoverkon operaat-

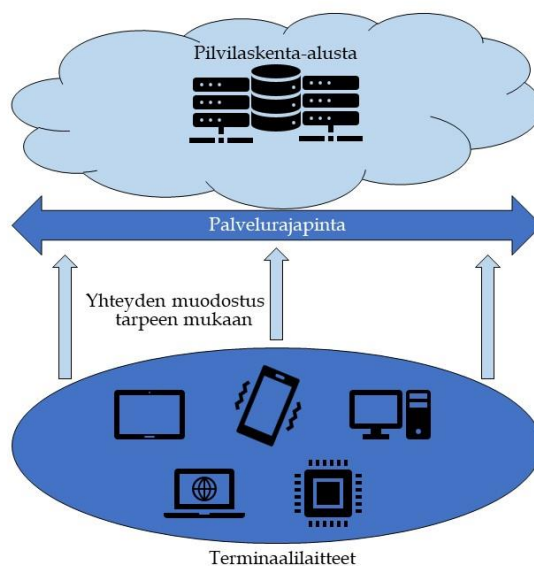
torien kokemista haasteista ennakoidaan olevan dataliikenteen suuri kasvu (Singh, Chiu, Tsai & Yang, 2016). Yksittäisessä pilvessä on useita rajoituksia, liittyen tulevan älykkään 5G-mobiiliverkon asettamiin laskennallisiin vaatimuksiin. Laskennallisia vaatimuksia ovat: matala latenssi, helppo liikutettavuus, suuri skaalautuvuus, ja reaaliaikainen suoritettavuus (Kitanov & Janevski, 2017).

Yleiset pilvipalvelujen tarjoajat (kuten esim. *Google*, *Amazon* ja *Salesforce*) voivat helpottaa kolmannen osapuolen toimijoiden sovelluskehitystä pienemmillä kustannuksilla, ja tarjoamalla laskentaresursseja. Laskentaresurssit voidaan jakaa: infrastruktuuriin palveluna (engl. *Infrastructure as a Service/IaaS*) (mm. palvelimet, tietoverkot ja säiliöt), laskenta-alustaan palveluna (engl. *Platform as a Service/PaaS*) (mm. käyttöjärjestelmät ja väliohjelmistot) ja sovelukseen palveluna (engl. *Software as a Service/SaaS*) (mm. sovellusohjelmistot) (Taleb, Samdanis, Mada, Flinck, Dutta & Sabella, 2017).

Pilvilaskenta tarjoaa operaattoreille tehokkaan tavan ylläpitää dataa, palveluita, ja sovelluksia, tuomalla erilliset systeemit yhden verkkotunnuksen (engl. *domain*) alle. Silloin useita palveluita voidaan ottaa käyttöön, korkeamman joustavuuden ja käytettävyyden saavuttamiseksi, kun samaan aikaan, rahalliset kustannukset (*CAPEX*) ja operationaaliset kustannukset (*OPEX*) pysyvät matalina (Ahmad ym., 2018). Pilvilaskenta mahdollistaa myös *Big Data*:n varastoinnin, prosessoinnin, ja hallinnan (Peralta, Garrido, Bilbao, Agüero & Crespo, 2019).

5G-radioliityntäverkossa (*5G-RAN*) tulee olemaan keskitetty pilvi 5G-verkon ytimessä (*C-RAN*) ja jakautunut pilvi (*Fog-RAN*), sekä lisäksi jakautunut vertaismobiilipilviverkko (engl. *peer-to-peer mobile cloud*) älykkäiden 5G-päätelaitteiden välillä. Keskitetty pilvi 5G:n ytimessä sisältää korkean suorituskyvyn omaavia laskentasolmuja (engl. *computing node*), jotka tarjoavat ubiikin, laaja-alaisen, kätevän, sekä käyttötarkoituksen mukaisen internetyhteyden, konfiguroitavissa olevien laskentaresurssien jakautuneeseen varantoon. Siihen kuuluvat tietoverkot, palvelimet, muisti, sovellukset, ja palvelut, joita voidaan varustella ripeästi, ja julkaista siten, että palveluntarjoajan interaktio on minimaalinen. Mobiililaitteiden rajoittunut dataprosessointi, ja varastointikapasiteetti, ratkaistaan siirtämällä tallennus ja prosessointi, mobiililaitteilta pilvilaskentasolmuihin. Tähän vaaditaan kuitenkin suuri kaistanleveys, ja matala latenssi. (Kitanov & Janevski, 2017.)





KUVIO 1. Pilvilaskennan rakenne (mukaillen: Jiang ym., 2020, artikkelin "A review of techniques and methods for IoT applications in collaborative cloud-fog environment", sivulla 3 olevaa kuviota.)

Seuraavassa tutkielman osassa syvennytään tarkemmin relevanttiin ja kehittyneempään konseptiin, joka on nimeltään mobiilipilvilaskenta. Se tarjoaa ratkaisun vähäiset laskentaresurssit omaaville mobiilikäyttäjille, laskentaintensiivisten tehtävien suorittamiseen (Liu ym., 2020).

Mobiilipilvi koostuu pääasiassa kahdesta osasta, paikallisesta pilvestä (engl. *local cloud*) ja etäpilvestä (engl. *remote cloud*). Sen pääfunktio on siirtää suurta laskentatehoa vaativia tehtäviä mobiililaitteilta pilveen. Silloin mobiililaitteiden laskentatehoa, varastointikapasiteettia, ja akun virtaa säästyy (Chen ym., 2015).

#### 4.1 Mobiilipilvilaskenta (MCC)

Mobiilipilvilaskenta (engl. *Mobile Cloud Computing/MCC*) voidaan ajatella pilvilaskennan ominaisuuksien, kuten esim., mukautuvuuden, skaalautuvuuden, saatavuuden, ja itsetietoisuuden laajenuksena mobiililaskentaympäristössä. Tietoverkon arkkitehtuurin näkökulmasta, MCC esiintyy infrastruktuuripalveluna (*IaaS*) datan varastointiin ja prosessointiin, mobiililaitteiden ulkopuolella, kasvattaen näin mobiililaitteiden resurssikapasiteettia. Tässä paradigmassa sovellus- ja palvelukehitys helpotuu samaan tahtiin MCC:n kehityksen kanssa, jolloin käyttäjäkokemuksen on mahdollista muuttua oppimisen, viihtymisen, sosiaalisen verkostoitumisen, päivittyvän uutisvirran ja liiketoiminnan työkaluksi. (Taleb ym., 2017.)

MCC on pilvilaskennan erikoistapaus, jossa käyttäjä pääsee käsiksi pilvipalveluihin mobiililaitteen avulla. MCC voi parantaa akun kestoa purkamalla

energiaa kuluttavia tehtäviä mobiililaitteelta pilveen, ja mahdollistaa mobiililaitteille monimutkaisempien sovellusten suorittamisen, sekä tarjota merkittävästi suuremman datan varastointikapasiteetin. Lisäksi, myös luotettavuus paranee, koska dataa voidaan varastoida ja varmuuskopioida mobiililaitteita varmemmin toimivien laitteistojen kokoonpanoihin, jotka on suunniteltu erityisesti tiedon varastointia varten. Nämä hyödyt tulevat tyypillisten pilvilaskennan hyötyjen lisäksi, mikä tuo erityisesti resurssit, joko muistin, tai sovellukset, käyttäjän saataville ilman, että käyttäjän tarvitsee omistaa itse monimutkaisia laitteita tai sovellustyökaluja. (Barbarossa, Sardellitti & Di Lorenzo, 2014.)

Tutkimus on tällä hetkellä alustavassa vaiheessa 5G-systeemien liittämiseksi mobiilipilvilaskentaan (MCC). Vaikka kirjallisuudessa on ollut suuri myötävaikutus, liittyen datan ja koodin purkamiseen, mobiililaitteilta pilveen. Niin siitä huolimatta, ei ole olemassa merkittävää kontribuutiota MCC:n liittämiseksi 5G-palveluihin. Näin ollen, aikaisemmin mainituilla mobiilipilvilaskennan hyödyllisillä ominaisuuksilla, on vielä käyttämätöntä potentiaalia. (Sarvabhatla ym., 2017.)

Pilvilaskennan vikkellä kehitystyö, on vähitellen kasvattanut, data-intensiivisten palveluiden suosiota. Nämä pilvipalvelujen portfoliot, ovat kiinnittäneet paljon huomiota viime vuosina, sekä yliopistomaailmassa että teollisuudessa. Pilvilaskentaympäristöstä on tullut paras laskennallinen paradigma, kun puhutaan useiden dataresurssien käyttämisestä samanaikaisesti. Käyttäjävaatimusten täyttämiseksi, prosessi, palvelujen suorittamiseksi pilvipalveluissa, on useimmiten mallinnettu useiden palveluntarjoajien, ja useiden sovellusten systeemiarkkitehtuurina. Sen jälkeen, kun käyttäjä, on lähettänyt palvelimelle pyynnön (engl. *request*), niin useiden palveluntarjoajien, useat pilvipalvelut, voidaan yhdistää interaktiivisten palvelujen kokoonpanoksi, joka tarjoaa pilvilaskennallisen ratkaisun, tiettyihin laadullisiin vaatimuksiin vastaamiseksi. Sentralisoitu lähestymistapa *Big Data*:n prosessointiin, jossa pilvilaskenta on ytimessä, keskittää ja yhtenäistää, suuren resurssimäärän hallinnoinnin. Pyyntöjen dynaaminen allokointi on tehokasta, sekä helposti mukautettavissa, ja se vastaa myös liiketoiminnallisiin vaatimuksiin. Tästä huolimatta, täysin keskitetty pilvilaskentamalli kärsii tietoverkon latenssista, ja energiankulutusongelmista, silloin kun dataa siirretään, ja prosessoidaan. Sen avainteknologiat eivät myöskään kykene täyttämään, suuren datamäärän prosessointiin tarvittavia, vahvan ja reaaliaikaisen suorituskyvyn vaatimuksia. Näiden haitta-puolien huomioimiseksi tulevaisuudessa, on tulossa esiin jakautuneempi laskentaparadigma, jonka nimi on mobiilireunalaskenta (MEC). Se tuo laskennan ja datan tallennustilan lähemmäksi haluttua sijaintia, vasteaikojen lyhentämiseksi, ja kaistaleveyden säästämiseksi. (Pang, Hao, Park & Maio, 2020.)

Vaikka mobiilipilvilaskenta on mahdollistanut paljon palveluita, erityisesti sellaisia sovelluksia, jotka toimivat mobiililaitteilla (mm. älypuhelimet ja tabletit), niin se epäonnistuu täyttämään, 5G:n ja IoT:n asettamat tiukemmat vaatimukset, kuten matalamman latenssin jne. Ensimmäinen syy tähän on se, että keskitetty pilvilaskenta-arkkitehtuuri heikentää loppukäyttäjien käyttäjäkokemusta, koska vasteajat ovat pitkiä. Toiseksi, Keskitetyssä mobiilipilvi-

laskennassa (MCC) ilmenee myös tietovuotoja ja tietoturvaongelmia, koska datan täytyy siirtyä kokonaisuudessaan keskitettyyn pilveen. Kolmanneksi, suurin osa *IoT*-datasta prosessoidaan perinteisesti kaukana sijaitsevien datakeskusten keskitetyssä pilvessä, mikä tekee kommunikaation latenssista, ja tietoverkon kaistanleveydestä, kriittisiä pullonkauloja. Yksi vaihtoehto näiden ongelmien ratkaisemiseksi, on suorittaa pilvilaskentaa 5G-radioliityntäverkossa (5G-RAN). Jakautunut pilvi 5G-RAN:ssa, voi esiintyä kahdessa muodossa, ne ovat: pilviradioliityntäverkko (C-RAN) ja sumuradioliityntäverkko (FogRAN). (Kitanov & Janevski, 2017.)

Muutaman viime vuoden aikana, päivittäiseen elämäämme, on ilmaantunut lukuisia uusia mobiilisovelluksia; ajanviettoon, liiketoimintaan, koulutukseen, terveydenhuoltoon, sosiaaliseen verkostoitumiseen, ja niin edelleen. Samanaikaisesti, mobiilidatamäärän ennustetaan kaksinkertaistuvan joka vuosi. Jotta tässä aaltoilevassa kehityksessä pysyttäisiin mukana, tietoliikenneoperaattoreiden täytyy nähdä valtava määrä vaivaa, käyttäjäkokemuksen kehittämiseksi, ja samanaikaisesti myös taloudellista tuottavuutta, täytyy ylläpitää. Tämän hetkisten radioliityntäverkkojen (RAN) rajoitteiden häivyttämiseksi, on esitelty kaksi orastavaa ajatusmallia:

- Pilviradioliityntäverkko (C-RAN), jonka tavoitteena on keskittää tukiasemien (engl. *Base Station/BS*) funktiot, virtualisoinnin avulla.
- Mobiilireunalaskenta (MEC), ehdottaa tietoverkon reunan (engl. *edge*) laskentatehon voimistamista.

Vaikka nämä kaksi teknologiaa, haluavat kumpikin siirtää laskentakapasiteettia eri suuntiin (reunalle *vs.* pilveen), niin ne täydentävät toisiaan, ja niillä molemmilla on omaleimaiset positiot, viidennen sukupolven informaatioteknologiaekosysteemissä. (Tran, Hajisami, Pandey & Pompili, 2017.)

## 5 Keskitetty pilviradioliityntäverkko (C-RAN)

Viime aikoina keskitetty pilviradioliityntäverkko (engl. *Cloud Radio Access Network/C-RAN*) on kiinnittänyt tutkijoiden huomion, yhtenä mahdollisena vaihtoehtona, radioliityntäverkoissa (RAN) tapahtuvan prosessoinnin keskittämiseen. C-RAN-tyyppisessä ratkaisussa etäohjattavat radiopäätteet, on yhdistetty datakeskukseen, valokuitukaapeleiden avulla. Datakeskuksessa suoritetaan kantataajuuden prosessointi kokonaisuudessaan (Wubben ym., 2014). Myös huomattava osa innovatiivista sovelluksista toimii pilviradioliityntäverkon (C-RAN) tasolla. C-RAN-paradigma keskittää kantataajuuskaistan prosessointiresurssit yhteen varantoon, ja virtualisoi tarvittavat tukiasemien komponentit. (Liu ym., 2020.)

C-RAN avaa ovia useille uusille sovelluksille 5G-aikakaudella. Se tarjoaa mahdollisuuden käyttää signaalinprosessointisovelluksia, joilla on palvelusta riippuva erikoistehtävä. Signaalinprosessointialustan joustavuus ja skaalautuvuus heijastuu palveluiden, käyttötapausskenaarioiden, ja sovellutuksien kirjona. Lisäksi C-RAN:ssa voidaan huomioida päteohjelmien kompleksisuus ja kyvyt samanaikaisesti, kun signaalia prosessoidaan. Viimeisimpänä, C-RAN välttää mobiilirunkoverkoissa tyypillisen palvelimen ruuhkautumisen ongelman, implementoimalla pilvialustat. (Wubben ym., 2014.)

Pilvilaskenta tarjoaa radioliityntäverkoille kyvyn laskennallisen kuorman tasapainottamiseen. Tämä auttaa prosessoinnin kohdistamisessa kriittisiin operaatioihin, esimerkiksi sellaisissa tilanteissa, joissa väylä on heikko, tai systeemissä esiintyy muita häiriötekijöitä. Tällaisissa skenaarioissa, saattaa esiintyä tarve kehittyneemmille laskenta-algoritmeille, joita voidaan suorittaa pilvilaskentaympäristössä (Wubben ym., 2014).

Nykyiset C-RAN-asennukset perustuvat kantataajuusprosessoreihin, jotka eivät tarjoa joustavaa, ja mukautuvaa alustaa sovelluskehitykselle. Tästä syystä, erittäin paljon pilvilaskentakapasiteettia jää hyödyntämättä (Rost ym., 2014). Keskitettyjä kantataajuusvarantoja on tutkittu, radioliityntäverkon resurssienkäytön tehostamiseksi, sekä kehittyneempien, ja monisoluisien algoritmien mahdollistamiseksi. Tästä huolimatta, nämä teknologiat tarvitsevat käyttötarkoituksesta riippuvaista laitteistoa, eikä niillä ole samoja tunnuspiirteitä, kuin

pilvilaskenta-alustoilla. Näitä tunnuspiirteitä ovat: kyky mukautua käyttötarkoituksen mukaisesti, virtualisointi, resurssivarannot, palvelun joustavuus ja helppo jaettavuus käyttäjien kesken, sekä käyttäjämäärien mitattavuus (Wubben ym., 2014).

Uudelleenmallinnetussa, keskitetyssä radioliityntäverkossa (*C-RAN*), fyysisen kommunikointikerroksen funktiot on erotettu tukiasemista, ja integroitu virtualisoituun prosessointikeskukseen. Radioliityntäverkon keskitetty luonne vähentää volyymin vaihtelua, ja parantaa mobiiliverkkojen energiatehokkuutta. *C-RAN* vaatii kuitenkin pilviprosessointiyksikön ja radiopäätteen välistä signaalinvaihtoa. Se asettaa tiukkoja vaatimuksia lähetetyn ja vastaanotetun datamäärän suhteen, kuin myös matalan viiveen osalta. *MEC*-standardi, eli mobiilireunalaskentastandardi, on hyödyllinen latenssin vähentämisen kannalta, ja se parantaa paikallisten operaattoreiden kykyä tarjota parempaa käyttäjäkokemusta, mutta sen laskentakyky ja tiedonvarastointikapasiteetti on vähäisempi, kuin radioliityntäverkon (*C-RAN*) keskitetyissä pilvissä. (Wang, 2020.)

Modernin pilviradioliityntäverkon (*C-RAN*) arkkitehtuuria käytetään 3G- ja 4G-verkoissa. Siinä hyödynnetään teknologioita, kuten *DWDM* (engl. *Wavelength-Division Multiplexing*) ja millimetriaaltoja (*mmWave*), korkean suorituskyvyn tarjoamiseksi (Chaudhary, Kumar & Zeadally, 2017). Pilviradioliityntäverkon päätehtäviä ovat resurssienjaon mahdollistaminen, dynaaminen resurssien allokointi, verkkoliityntälaitteiden virtualisoinnin avulla, ja spektraalisen tehokkuuden parantaminen. Samaan aikaan, energiankulutus ja palvelujen hinnat laskevat, kun taas radioyhteyden suorituskyky paranee (Chen ym., 2015). Kun etäradiopäätteet (engl. *Remote Radio Head/RRH*) siirretään lähemmäs käyttäjiä, on mahdollista saavuttaa suurempi systeemin kapasiteetti, ja pienempi energiankulutus. Tämä johtuu siitä, että signaalin ei tarvitse matkata pitkää matkaa, saavuttaakseen käyttäjät. (Peng ym., 2015.)

5G *C-RAN* koostuu pilvilaskentateknologian yhdistämisestä radioliityntäverkon (*RAN*) arkkitehtuuriin. Tämä mahdollistaa paremman resurssien käyttöasteen, ja tuo mukanaan joustavuutta, ja skaalautuvuutta. *C-RAN*, joka hyödyntää pilvilaskentateknologiaa, on suunniteltu tukemaan *IoT*-laitteita, joiden määrä on kasvanut valtavasti. Pilvilaskentateknologian resurssien yhdistäminen keskittämällä ja virtualisoimalla, sekä jatkuvasti parempi sovellus- ja laitteistoresurssien hyödyntäminen, ovat nimenomaan 5G:n ominaisuuksia. (Kaur & Moh, 2018.)

*IoT*:n ja *C-RAN*:n konvergenssi voisi käynnistää monien uusien innovatiivisten sovellusten kehityksen, useilla eri aloilla. Kun puhutaan vaikkapa älykkäistä kaupungeista, sähköverkoista, terveydenhuollosta ja muista ihmislämää helpottavista asioista (Tran ym., 2017). Oikeastaan useat eri mobiiliopeeraattorit, teollisuuden-alan toimijat, ja tutkimuslaitokset, tutkivat jatkuvasti pilviradioliityntäverkon potentiaalisia mahdollisuuksia. Tämän vuoksi, ei ole yhteneväistä mielipidettä siitä, millainen viidennen sukupolven *C-RAN* tulee olemaan (Peng ym., 2015).

Viime vuosina *C-RAN* on esitelty 5G-verkkoja muuttavana arkkitehtuurina, joka tuo pilvilaskennan tarjoamaa skaalautuvuutta ja joustavuutta, lan-

gattomaan kommunikaatioon. Datasisällön tallentamisesta muistiin, langattomissa tietoverkoissa, on tullut pääasiallinen ratkaisu, matalamman latenssin saavuttamiseksi, kun datasisältöä käsitellään, ja runkoliityntäyhteyttä kuormitetaan. Tämä on johtanut parempaan käyttäjäkokemukseen, ja tietoverkkojen käytön hinnan alenemiseen (Tran ym., 2017).

*C-RAN*-asennukset eivät kuitenkaan ole helposti muunneltavissa. Tämä johtuu siitä, että vain jo olemassa olevaa valokuituverkkoa voidaan hyödyntää, tai muuten, pääsy valokuituverkkoon pitää rakentaa, mikä on erittäin kallista. Näin ollen, systeemiarkkitehtuuri, joka tarjoaa tarvittavat rajapinnat, ilman merkittäviä muutoksia olemassa olevaan kokoonpanoon, on välttämättömyys, *C-RAN*:in käyttöönottamiseksi (Wubben ym., 2014; Rost ym., 2014).

Virtualisointi ja *C-RAN* voivat mahdollistaa merkittävää energian säästöä. On ollut puhetta jopa 38% energiankulutuksen laskusta koko tietoverkossa. Lisäksi, virtualisointi voi parantaa energiatehokkuutta entisestään, jos hyödynnetään tekniikoita, kuten virtuaalisten koneiden yhteensovittamista. *C-RAN*-arkkitehtuurin suorituskyvystä, energiatehokkuudesta, tai sen käyttöönoton kustannuksista, ei kuitenkaan ole vielä tehty kvantitatiivisiä arvioita, tai keskusteltu riittävän kattavasti kirjallisuudessa. (Bassoli, Di Renzo & Granelli, 2017.)

*C-RAN*:in muita hyötyjä ovat käyttäjien helpompi laskuttaminen ja palvelun joustavuus ja skaalautuvuus (Chimeh, 2020). Sen päätavoite on parantaa merkittävästi spektraalista tehokkuutta ja reunasolmujen suoritusnopeutta (Chen ym., 2015). *C-RAN*-arkkitehtuuri on myös paremmin varustettu kohtaamaan häiriötekijöitä (Kaur & Moh, 2018).

Tyypillinen pilviradioliityntäverkko, koostuu kevyistä ja etäohjattavista radiopääteistä (*RRH*), joita on sijoitettu solualustoille. Kantataajuusyksikköä (*BBU*) hostataan pilvikeskuksessa, kun korkean siirtonopeuden ja matalan latenssin omaavat fronthaul-linkit, yhdistävät *RRH*:t ja *BBU*:n. Kantataajuusyksikön pilvilaskentainfrastruktuuri, jolla on suuri laskentateho, ja tallennuskapasiteetti, tarjoaa nyt toimivan väylän sisällönhallintaan, ja dataliikenteen purkamiseen, mobiilikäyttäjiltä saapuvan verkkoliikenteen hallitsemiseksi. (Tran ym., 2017.)

Viidennen sukupolven suurin haaste tulee olemaan, sellaisen tietoverkkoarkkitehtuurin kehittäminen, joka pystyy mukautumaan vaihtelevaan dataliikenteen määrään, ja joka koostuu lupaavista teknologioista, kuten reunalaskennasta, sovellusten määrittelemästä tiedonsiirrosta (*SDN*), virtualisoinnista, ja jossa yhdistyy langalliset ja langattomat elementit, lukuisten vertikaalisten toimialojen asettamiin vaatimuksiin vastaamiseksi. Vertikaaliset toimialat määrittelevät useita 5G:n vaatimuksista, ja todellinen käyttäjämäärä saattaa vaihdella. Tästä syystä, vaaditaan arkkitehtuuri, joka on dynaaminen, ja joka osaa priorisoida dataliikennettä, sekä kykenee varmistamaan, että reunalaskentatehoa on saatavilla, nopeaa ja tehokasta prosessointia ja vastaamista varten. (Ding & Janssen, 2018.)

Tulevaisuuden mobiiliverkot tulevat tarjoamaan heterogeenisiä runkoliityntäyhteyden ratkaisuja, jotka ovat optimoitavissa, eri käyttöskenaarioiden

mukaisesti. Väliytiskanavien sekoituksessa, yhdistyvät yhä keskitetympien radioliityntäverkkojen ratkaisut, jotka vaativat suurta runkoliityntäyhteyden kapasiteettia, sekä yhteensovittavuutta hajautettujen ratkaisujen kanssa. Hajautettujen systeemien runkoliityntäyhteyksissä on huonompi latenssi, ja heikompi suoritusteho (Wubben ym., 2014).

Joitakin kehittyneitä teknologioita, kuten esimerkiksi pilviradioliityntäverkkoa (*C-RAN*), ja ultra-pienistä soluista koostuvaa heterogeenistä tietoverkkoa (*HetNet*), on ehdotettu potentiaalisiksi 5G-ratkaisuiksi. *C-RAN* on herättänyt intensiivistä tutkimuskiinnostusta, sekä tiedeyhteisöltä että teollisuudelta. Näitä teollisuuden toimijoita ovat esimerkiksi *China Mobile*, *Huawei*, *Alcatel Lucent* ja *Qualcomm* (Peng ym., 2015).

## 5.1 Heterogeeniset tietoverkot

Vaikka *C-RAN* käyttää pilvilaskentaa tukiasemien suorittamien operaatioiden virtualisointiin, sillä on silti rajallinen kapasiteetti ja suuri viive. Kokonaissuorituskyvyn parantamiseksi, 5G-teknologia käyttää heterogeenisiä tietoverkkoja (engl. *Heterogenous networks/HetNets*), jotka liittävät eri radioliityntäverkot toisiinsa. Niissä erilliset pienet solut (engl. *small cells*), tekevät kapasiteetin ja kentän kasvattamiseen, sekä viiveen vähentämiseen, vaadittavan työn (Chaudhary ym., 2017). Heterogeenisten tietoverkkojen käyttöönotto on esimerkki siitä, kuinka kompleksisuus- ja hintakertoimet kasvavat 5G-aikakaudella. *HetNet*:t hyödyntävät tiheään sijoitettuja pieniä soluja, kantavuuden ja kapasiteetin kasvattamiseen. Siihen vaaditaan suurempi määrä antennia, ja siitä syystä teknologiaa, joka on kalliimpaa, ja jota on monimutkaisempaa rakentaa ja operoida. (Houatra & Tseng, 2018.)

Jos pienten multi-radio-solujen (engl. *multi-radio small cells*) levittämisestä tiheään, tulee valtavirtaa, kun suunnataan kohti 5G:tä, niin rahalliset-, ja operationalliset kustannukset, tulevat kasvamaan merkittävästi. Lyhyesti sanottuna, uusien tukiasemien asentaminen ja hallinnointi on kallista. Tästä syystä, tiheet *HetNet*:t saattavat joskus vaatia kohtuuttomia investointeja tietoliikenneoperaattoreilta, mikä voi johtaa siihen, että operaattorit alkavat etsimään vaihtoehtoisia ratkaisuja mobiiliverkkoliikenteen purkamiseksi. Lisäksi, tietoverkon hallinnointi multi-radioliityntäteknologiaa sisältävillä, ja eri kokoisilla pienillä soluilla (engl. *small cells*), voi johtaa merkittäviin haasteisiin, kun solujen ristikkäistä vuorovaikutusta koordinoidaan. Silloin, verkon tukipalvelun toiminnasta, voi tulla erittäin monimutkaista. (Shorgin ym., 2014.)

Yksi heterogeenisten tietoverkkojen hyödyistä, on erottaa hallinnointitaso käyttäjätasosta. Jotta heterogeenisistä tietoverkoista saataisiin kaikki hyöty irti, niin on kriittistä vaimentaa häiriötekijät, kehittyneiden signaalinprosessointitekniikoiden avulla (Peng ym., 2015). Toisin kuin pilviradioliityntäverkossa (*C-RAN*), tässä arkkitehtuurissa pilvi ei prosessoi käyttäjien dataa, eivätkä pienet solut lähetä käyttäjien dataa pilveen prosessoitavaksi. Sen sijaan, tässä mallissa keskitytään enemmänkin pienten solujen operointiin, ylläpitoon, ja hallin-

nointiin, jotta palveluita kyettäisiin tarjoamaan, hyödyntämällä verkkoresursseja tehokkaasti (Zhang ym., 2015). Tärkeä viimeaikainen trendi heterogeenisissä tietoverkoissa, on matkapuhelinverkon (esim. *3GPP LTE*) ja lähiverkon (engl. *Local Area Network/LAN*) yhteistoiminta. Sivumennen sanoen, myös esim. langaton *Wi-Fi*, on lähiverkko (Shorgin, Samouylov, Gudkova, Galinina & Andreev, 2014).

Kun 5G-mobiiliverkot sisällyttävät edistyksellisesti erilaisia teknologioita pilvilaskenta-arkkitehtuureihin, niistä tulee luonnostaan enemmän heterogeenisiä. Silloin resurssien allokointi-, ja hallinnointiprosessit muuttuvat monimutkaisemmiksi. Kun tämän lisäksi otetaan huomioon muut kasvavat haasteet, jotka liittyvät, jaetun palvelun varustamiseen, uudelleen ohjelmoitavuuteen, avoimeen tietoliikenteeseen ja monikäyttöisyyteen, niin verkon hallitsemiseksi, tarvitaan yhteneväisiä sopimuksia ja pilven organisointia. Tällä hetkellä, lukuisia ajatusmalleja on kehitteillä, teollisuudessa ja standardisointiyksiköissä. (Taleb ym., 2017.)



## 6 Sumulaskenta (FC)

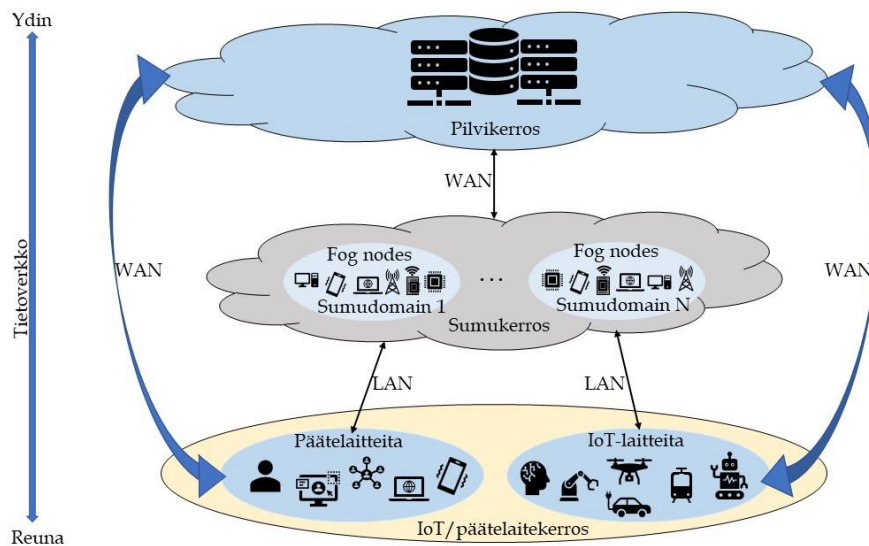
Sumulaskenta (engl. *Fog Computing/FC*) on pilvilaskennan lisäosa. 5G-tekniologian nousu vauhdittaa sumulaskentatekniikan soveltamista. Jiang ym. (2020) odottavat 5G-verkkoon perustuvan sumulaskentatekniikan olevan avainasemassa, kun puhutaan älykkäistä roboteista, tai itseohjautuvista autoista. Pilvilaskennan täydennyksenä, sumulaskennalla on useita erottuvia ominaispiirteitä pilvilaskentaan verrattuna. Pilvilaskenta perustuu sosiaaliseen ja julkiseen pilveen, ja IT-operaattorien tarjoamiin palveluihin, kun taas sumulaskenta perustuu useisiin pienempiin, yksityisten käyttäjien ja yritysten pilviin. Pilvilaskenta koostuu tyypillisesti korkean suorituskyvyn omaavien laskentalaitteiden klustereista, kun sumulaskennassa työtehtäviä keskitetään enemmän yksittäisille tietokoneille, joista jokaisella on oma funktionsa järjestelmässä. (Jiang ym., 2020.)

Esineiden internetin ja 5G-verkkojen kehityksen seurauksena, perinteinen pilvilaskenta on muuttumassa sumulaskennaksi. Sumulaskennassa mobiililaskentaa, verkonhallintaa ja tallennustilaa työnnetään, perinteisten datakeskusten sijaan, tietoverkkojen reunoille, jolloin matalan latenssin ja korkean laskentatehon vaatimien sovellusten toiminta helpottuu. Sumulaskennassa on useita haasteita, jotka liittyvät resurssien allokontiin, käyttäjien tietoturvaan, sekä heterogeenisten tietoverkkojen ohjelmointi- ja testausmallien, ja tukitoimintojen tavoittamattomuuteen (Shahzadi, Niaz, Ali, Naeem, Rodrigues, Joel, Qamar & Anwar, 2019).

Sumulaskentaan liittyy laskentakerroksien määrää kasvattavia laitteita, kuten esim. langattomia reitittimiä ja M2M-portteja. Näitä laitteita voidaan kutsua myös sumusolmuiksi (engl. *Fog Node/FN*). Sumusolmuissa lasketaan ja varastoidaan päätelaitteilta tulevaa dataa paikallisesti, ennen kuin se siirretään pilveen. Sumuverkon heterogeenisuus johtuu sen sijainnista, tietoverkon reunalla. Tästä syystä sumuverkon päätehtäviä ovat datan kerääminen, ja yhteyden ylläpito sumusolmujen (FN) kanssa. (Shahzadi ym., 2019.)

Yleisesti ottaen, sumulaskenta on kehittyvä laskenta- ja varastointikerros päätelaitteiden ja pilvilaskentaa suorittavien datakeskusten välissä. Sumuverkot tuovat sumusolmut lähelle *IoT*-pätelaitteita, ja käyttävät niitä suorittamaan

merkittävän osan laskentatehoa vaativista tehtävistä. Vaikka sumukonsepti on jossain määrin saman kaltainen kuin MEC, niin sumulaskenta soveltuu paremmin esineiden internetin (IoT) sovelluksille. Kolme pääskenaariota, jotka hyötyvät sumulaskennasta eniten, ovat lisätty todellisuus (AR), sisällön jakelu IoT-laitteille ja Big-Data-analytiikka. Reaaliaikaisesti sumuverkossa toimiviin sovelluksiin kuuluvat esimerkiksi älykkäät autot; -sähköverkot, -liikennevalot, -junat, -talot, -teollisuuden koneet ja langattomat sensorit yms.. Sumuverkot helpottavat saavuttamaan pienemmän latenssin, paremman tuottavuuden, paikan- ja sisällöntuntemuksen, sekä syötteen laadun (QoS). Tämän lisäksi, sumuverkon käyttöönotto poistaa monta pilvilaskentaan liittyvää rajoitetta, ja madaltaa virheen mahdollisuuden palveluiden käyttöönotossa alhaiselle tasolle, tai jopa olemattomaksi. Tämä on tärkeää erityisesti terveydenhuollossa ja teollisuudessa. Ennen kuin, sumuverkot voidaan ottaa käyttöön suuressa mittakaavassa, on kuitenkin otettava huomioon tiettyjä haasteita. Niitä ovat tietoturva, uudelleen ohjelmoitavuus, heterogeenisten tietoverkkojen tukitoiminnot, skaalautuvuus, sekä äärimmäisen matalan latenssin vaatimus. (Shahzadi ym., 2019.)



KUVIO 2. Sumu-pilvi-systeemin rakenne (mukaiillen: Jiang ym., 2020, artikkelin "A review of techniques and methods for IoT applications in collaborative cloud-fog environment", sivulla 3 olevaa kuviota.)

Sumulaskenta on moderni tietoverkkomalli, joka kehittyi samaan tahtiin ja vikkellästi, esineiden internetin, radioliityntäteknologioiden, ja innovatiivisten reunalaskentalaiteiden kanssa. Se on lupaava ratkaisu moniin pilvilaskentaa rajoittaviin tekijöihin, mutta vaatii edelleen selvitystyötä, liittyen esim. resursien allokointiin, tietoturvaan ja mobiliteettiin (Shahzadi ym., 2019). Myös Labuda & Gillespie (2017) uskovat, että teoreettinen lisätutkimus on välttämätöntä, sumulaskentaympäristön tarjoamien ratkaisujen selvittämiseksi, tulevaisuudessa esiintyvien, valtavien datamäärien hallintaan.

Sumulaskentaverkot tasapainottavat kasvavaa kysyntää, joka koskee sensoriverkkoihin rakennettuja sovelluksia, jotka tuottavat, hallinnoivat, ja varastoivat suurta datamäärää (*Big-Data*). Kun pidetään mielessä sumulaskenta-arkkitehtuurin valtava laajuus, ja kompleksisuus, niin testausohjelmien kehittäminen ja käyttöönotto, näissä tietoverkoissa, voi olla äärimmäisen haastavaa. Tästä syystä, on olennainen tarve, vain ja ainoastaan simulointiin tarkoitettulle ympäristölle, joka kykenee jäljittelemään tehokkaasti todellista ske-naariota (Shahzadi ym., 2019).

Sumuverkko vähentää, reunan käyttäjästä (engl. *edge user*) kaukana sijaitsevaa, ja datakeskusta kohti takaperin etenevää, kriittistä dataa. Tämä ei säästä pelkästään kaistanleveyttä, vaan vähentää myös riskiä verkko-hyökkäykselle, koska reunalaitteiden ja datakeskuksen välinen polku pienenee. Näin ollen, paikallinen prosessointi, jota tehdään käyttäjän päädyssä, voi merkittävästi parantaa verkon kokonaistietoturva. Sumuverkot mahdollistavat myös palvelujen johdonmukaisuuden ja jatkuvuuden. (Shahzadi ym., 2019.)

Sovelluskehittäjät tarvitsevat yhteneväisen rajapinnan, ja ohjelmointimal-lin, jotta he voisivat yhdistää valmiit sovellukset sumulaskenta-alustaan. Se mahdollistaisi sovellustietoiset komponentit, ja sallisi tarkoitusta vastaavan op-timoinnin, useille erilaisille sovelluksille, muodostaen näin sovelluskeskeistä laskentaa. Sovelluskehittäjille on myös ongelmallista järjestää hierarkkisia, dynaamisia, ja heterogeenisiä resursseja, useiden alustojen kanssa yhteensopivien, sovellusten luomiseksi (Shahzadi ym., 2019).

## 7 Reunalaskenta (EC)

Reunalaskenta (engl. *Edge computing/EC*) soveltuu ratkaisuksi pilvipalveluihin liittyviin haasteisiin. *EC* tarjoaa välikerroksen (*edge layer*) *IoT*-päätelaitteiden ja pilven välille, vähentäen näin laskentakuormaa datakeskuksissa. Jotkut tehtävät, joihin ei tarvita lainkaan pilvessä tapahtuvaa laskentaa, siirretään reunakerroksen laitteisiin. Tämän seurauksena prosessoinnin latenssi laskee, kun samaan aikaan, tuki päätelaitteiden mobiliteetille säilyy. Käytössä olevien kommunikaatioprotokollien, palveluiden, reunalaitteiden, ja tietoverkon tyyppistä riippuen, reunakerros voidaan implementoida monella eri tavalla. Mobiilireunalaskenta (engl. *Mobile Edge Computing/MEC*), Sumulaskenta (*FC*) ja pilvihattaralaskenta (engl. *Cloudlet Computing/CC*), ovat erilaisia keinoja, reunakerroksen implementointiin. (Shahzadi ym., 2019.)

Reunalaskenta on tiedon prosessoinnin, varastoinnin ja sovellusten ydintoimintojen fuusio, joka sijaitsee lähellä tietoverkon reunaa, mahdollisimman lähellä lähdetietoa. Se on jakautunut ja avoin alusta, jota käytetään täyttämään teollisuuden tarve digitaaliselle ja ketterälle konnektiivisuudelle, liiketoiminnan toteuttamiselle, ja datan optimointiin (Pang ym., 2020). Komputaation purkamisen lähellä sijaitsevaan pilveen on tarpeellista, jotta voitaisiin saavuttaa nopea vasteaika, vähäisin resurssein. Tässä kontekstissa pilvihattaralaskenta ja *MEC* ovat prototyypimalleja, joissa pilvipalveluja puretaan tietoverkon reunalalle, lähetyvillä olevien äylaitteiden palvelemiseksi. Pilvihattarapalvelut toimivat älypuhelinsovelluksissa, kuten kasvojen- ja puheentunnistuksessa, gps-navigoinnissa, ja terveydenhuollossa (Chaudhary ym., 2017). Perinteinen pilvenhattara koostuu useista staattisista tietokoneista. Kuitenkin, virtualisointiteknologioiden kehityksen ansiosta, mobiilitietoverkkolaitteista voi tulla riittävän kyvykkäitä suorittamaan laskentafunktion, joka mahdollistaa pääsyn etäpilveen, samoin kuin pilvenhattara tekee nyt (Chen ym., 2015).

Pilvilaskenta on avainteknologia mobiilireunalaskennan taustalla. *MEC*:iä voidaan pitää pilvilaskennan lisäosana, ja kehittyneempänä muotona. Pilvilaskennan avulla virtuaalikoneita voidaan ottaa käyttöön, korkean tilavuuden omaavilla, yleiskäyttöisillä palvelimilla, jotka voivat sijaita esim. tukiasemilla, tai yhdyskäytävissä (engl. *gateway*). Pilvilaskennan hyödyntäminen tietoverkon

reunalla, suo reunaverkolle riittävästi laskenta- ja varastointiresursseja. Tämä mahdollistaa useat MEC-palvelut. Viime aikoina tutkijat ovat osoittaneet suurta kiinnostusta reunalaskentaa kohtaan. (Liu ym., 2020.)

Teollisuuden digitalisaatio, verkkoon yhdistettyjen laitteiden määrän kasvu, ja kuluttajien tarve viihteelle, asettavat vaatimuksen suuremmalle tietojenkäsittelyteholle tietoverkon reunalla. Tekoälystä (AI) on tullut avaintekijä reunalaskennan omaksumisessa. Kun tarvitaan reaaliaikaisia toimintoja esimerkiksi koneiden hallinnassa, laitteistojen monitoroinnissa, tai etäkirurgiassa, niin on elintärkeää, että AI sijaitsee mahdollisimman lähellä tietoverkon reunaa. 5G:n, reunalaskennan ja tekoälyn yhdistäminen, luo mullistavia mahdollisuuksia sekä kuluttajille että yrityksille. Mutta samaan aikaan, syntyy myös uusia haasteita, liittyen esim. standardeihin, lainsäädäntöön, tukisysteemeihin, turvallisuuteen, ja liiketoimintamalleihin. (Shim ym., 2020.)

5G:n ja reunalaskennan avulla, videovalvontakuvaa voidaan analysoida ja hyödyntää useissa skenaarioissa reaaliaikaisesti. Supermarketeissa, asiakkaiden identifiointi onnistuu jo siinä vaiheessa, kun asiakkaat astuvat videokuvaan. Sitten kun yhdistetään aikaisemmat ostosarkistot ja personalisoidut tarjoukset, mainokset voidaan siirtää heidän älylaitteisiinsa välittömästi. Liikenteenvalvontavideoinnissa prosessointi voidaan reunalaskennan avulla suorittaa kadulla. Se mahdollistaa liikenneonnettomuuksien syiden paremman tunnistamisen, ja syvällisemmän prosessoinnin. Ruuhkautuneet alueet voidaan löytää nopeammin, ja ajoneuvon kuljettajille voidaan lähettää reaaliaikainen ilmoitus liikenneyhteyksien tilasta. (Wang, 2020.)

Reunapilvellä on tärkeä rooli 5G-verkkoarkkitehtuurissa. Se ei pelkästään tarjoa pilviresurssien upottamista reunalle, 5G:n virtualisaatiota hyödyntävissä tietoverkkoelementeissä, vaan se tekee myös sillan useille kolmannen osapuolen sovelluksille, hyödyllisten sovellusalojen luokse. Tämä herättää innovatiivista liiketoimintaa käyttäjäkokemuksen parantamiseksi. Lopulta syntyy uudenlainen ekosysteemi ja arvoketju (Huazhang, Zhonghao & Shuai, 2019).

Reunalaskennassa operoidaan matalalla kaistanleveydellä, joka mahdollistaa sen, että prosessointi on sirrettävissä lähemmäksi käyttäjää, tai datankeruuterminaalialia. Näin voidaan pienentää sijainnista rippuvaista kaistanleveyden rajoittuneisuutta. Tämä tapahtuu erityisesti silloin, kun reunasolmun (engl. *edge node*) tekemä laskenta, vähentää keskittimelle lähetettyjen pyyntöjen määrää, käsitellä suurta määrää dataa. Toiseksi, laskentaa suoritetaan lähellä päätelaitteita ja päätelaite voi saada reaaliaikaisen vastauksen. Kolmas reunalaskennan piirre on parempi yksityisyysensuoja. Paikallinen datankeruu ja lokaali tiedon analysointi ja prosessointi, vähentävät tehokkaasti datan vuotamista julkisiin tietoverkkoihin, ja parantaa näin datan yksityisyyttä. (Wang, 2020.)

Reunalaskennan konsepti syntyi korjaamaan mobiilipilvilaskennassa esiintyviä haittoja. Satyanarayanan ym. esittelivät vuonna 2009 pilvenhattaran (*Cloudlet*) konseptin. Pilvenhattara on kolmikerroksisen mallin keskimäinen kerros, keskitetyn datakeskuksen ja päätelaitteen välissä. Pilvenhattara, joka on tärkeässä osassa reunalaskennassa, voi helpottaa loppukäyttäjää saavuttamaan

paremman suorituskyvyn ja laskentatehon. Sen avulla datakeskuksen tarjoama palvelu, voidaan tuoda lähemmäksi älylaitteen käyttäjää. Pilvenhattaralla on kuitenkin oma rajoitteensa: siihen pääsee käsiksi vain langattoman (*Wi-Fi*) yhteyden avulla, joka ei ole saatavilla kaikilla alueilla. Näin ollen, kaikkialla toimivaa datayhteyttä ei voida luvata. Edellä mainitun haasteen seurauksena *European Telecommunications Standard Institute (ETSI)* ehdotti vuonna 2014 konseptia uudentalaiselle arkkitehtuurille, jota nimitettäisiin mobiilireunalaskennaksi (*MEC*) (Liu ym., 2020).

## 7.1 Standardisointi - ETSI MEC ISG

On muodostettu useita alueellisia foorumeja ja projekteja muotoilemaan 5G:n visiota ja tutkimaan sen avainteknologioita. 5G:n vaatimusten tutkimiseksi ja yksityiskohtaisemman standardisointiagendan kehittämiseksi, *European Telecommunications Standard Institute (ETSI)* järjesti marraskuussa 2013 huippukokouksen, jonka aiheena oli tulevaisuuden mobiiliteknologia. Kokouksen johdtopäätös oli, että 4G-verkoissa käytössä olevan *LTE*-standardin evoluutio ei välttämättä olisi kykenevä täyttämään tulevia 5G:n vaatimuksia (Andrews ym., 2014).

Vuodesta 2016, *3GPP*-ryhmä on standardisoinut 5G:tä kunnianhimoisesti, tarkoituksenaan kasvattaa tietoverkkojen suorituskehkoa ja tarjota infrastruktuuri, jolla on uudentalaisia käyttötarkoituksia. 5G-standardi on ollut tarkoitus julkaista kahdessa osassa. Ensimmäisessä osassa (kesäkuulta, 2018) alleviivataan kriittisimpiä vaatimuksia kaupallisen käyttöönoton kannalta. Toisessa osassa (2019) on tarkoitus täydentää sitä, mitä ensimmäisestä osasta puuttuu (Basin, Dreier, Hirschi, Radomirovic, Sasse & Stettler, 2018).

Esimerkiksi Suryanegaran ym. (2017) mukaan 5G-standardia ei kuitenkaan ole virallisesti määritelty, mikä tekee operaattoreille vaikeaksi tunnistaa, kuinka paljon investointeja tarvitaan verkkoinfrastruktuurin vuokraamiseen tai rakentamiseen. Käytännössä tietoverkon käyttöönotto olisi hyödytöntä, jos valokuidusta rakennettua verkkoa ei ole saatavilla. Toisin sanottuna, 5G:n implementointiin ja toimivuuteen vaaditaan valokuidusta rakennettu tietoliikenneverkko. Ilman sellaista, nopeaa ja kehittyntä tiedonvälitystä ei voida saavuttaa. Haasteena on synergisoida tietoverkon käyttöönottoon vaadittava investointi ja tietoliikenneverkon tarjoajan investointi. Pulma on siinä, että useimmat investoijat ovat kiinnostuneita ylläpitämään palveluita enemmän, kuin kasvatamaan valokuitukapasiteettia. (Suryanegara ym., 2017.)

*ETSI Industry Specification Group (ISG)* standardisoi tällä hetkellä *MEC*-teknologiaa, joka tarjoaa IT-palveluympäristön ja pilvilaskentakykyä radioliikenteenverkossa (*RAN*), tietoverkon reunalla, ja lähellä mobiilikäyttäjää. Lisäksi tarkoituksena on luoda avoin toimintaympäristö, joka mahdollistaa saumattoman, ja tehokkaan integraation kolmannen osapuolen sovelluskehittäjien välillä (Hu, Patel, Sabella, Sprecher & Young, 2015; Tran ym., 2017; Singh ym., 2016).

Nykyisten 4G-systeemien evoluutio on tarkemmin ottaen LTE-standardisointiprosessin tulosta. 3G-systeemien perinteitä kunnioittaen, 4G-systeemien kapasiteetin voidaan odottaa edelleen kasvavan. Tästä huolimatta, ETSI on julkistanut suunnitelman kohti 5G-systeemiä. Tarkoituksena on ollut ottaa käyttöön kaupallinen systeemi vuoteen 2020 mennessä (Barbarossa ym. 2014). Kun 5G-standardi julkistetaan virallisesti, markkinoiden odotetaan olevan valmistautuneina. Uusi teknologinen systeemi tullaan omaksumaan nopeasti teollisuudessa ja muualla yhteiskunnassa (Suryanegara ym., 2017).

Mobiilireunalaskennan (MEC) esitteli alunperin ETSI vuonna 2014. ETSI:n start-up-jäseniä ovat mm. HP, Vodafone, Huawei, Nokia, Intel ja Viavi. Suorittamalla välimuistin osittamista, datansiirtoa ja laskentaa mobiiliverkon reunalla, kompensoidaan runkoliityntäyhteyden viivettä (Wang, 2020). ETSI ISG MEC:n tuotoksia tulevat olemaan palveluskenaariot, vaatimuskriteerit, arkkitehtuuri, ja toteuttamiskelpoiset sovelluskehitysrajapintojen (engl. *Application Programming Interface/API*) määritelmät. Lisäksi tulee markkinointiin tarkoitettuja julkaisuja, jotka tähtäävät MEC:n omaksumiseen. MEC tukee erilaisia käyttöönottovaihtoehtoja, koska MEC-palvelimia voidaan sijoittaa useisiin eri sijainteihin radioliityntäverkossa (RAN), teknisistä ja liiketoiminnallisista vaatimuksista riippuen (Hu, Patel, Sabella, Sprecher & Young, 2015).

Työntämällä dataintensiivisiä toimintoja kohti tietoverkon reunaa, ja prosessoimalla dataa paikallisesti käyttäjien lähistöllä, mobiiliverkkooperaattorit voivat vähentää tietoliikenteen pullonkauloja, ydin- ja runkoliitymissä. Saman aikaisesti, raskaita laskennallisia tehtäviä voidaan purkaa virtarajoitteisista päätelaitteista tietoverkon reunalle. Syyskuussa 2016, ETSI ISG pudotti termin 'Mobile' pois MEC:stä ja nimesi sen uudelleen seuraavasti: "Multi-access Edge Computing". Nimenvaihdoksen tarkoituksena oli laajentaa MEC:n käytettävyyttä heterogeenisissä tietoverkoissa, kuten Wi-Fi:ssä (Taleb ym., 2017).

## 7.2 Multiyhteysreunalaskenta (MEC)

Multiyhteysreunalaskentaa (engl. *Multi-access Edge Computing/MEC*) voidaan pitää mobiilipilvilaskennan (MCC) evoluutiona (Liu ym., 2020). Se on kasvava ekosysteemi, jonka tavoitteena on konvergoida telekommunikaatio- ja IT-palveluja, tarjoamalla pilvilaskenta-alusta radioliityntäverkon reunalla. MEC tarjoaa tallennustilaa ja laskennallista suorituskykyä, mikä laskee mobiilikäyttäjien latenssia ja hyödyntää tehokkaammin mobiilirunkoliityntäyhteyttä ja kantaverkkoja (Taleb ym., 2017).

Kontekstuaalinen informaatio, ja spesifi sisältö sekä sijaintitietoisuus, voivat luoda liiketoiminta-arvoa lisääviä mahdollisuuksia, tarjoamalla kustomoitua mobiililaajakaistakokemusta. Palveluntarjoajat voivat myös hyötyä MEC:sta keräämällä enemmän informaatiota asiakkaiden käyttämästä sisällöstä, sijainnista, ja mielenkiinnon kohteista, mikä tekee asiakkaiden portfolioista paremmin erottuvia. Silloin asiakkaille on helpompi tarjota kohdennetusti uuden-

laisia palveluja, tai yksioikoisesti hyödyntää asiakasinformaatiota tehokkaampaan markkinointiin (Taleb ym., 2017). Muiden reunalaskenta-ajatusmallien, kuten pilvenhattaroiden (*Cloudlets*) ja sumulaskennan (*FC*) ohella, *MEC* voidaan ajatella siltana, lukuisten *IoT*-laitteiden ja keskitetyn pilven välillä (Liu ym., 2020).

*MEC* tarjoaa pilvilaskentakykyä radioliityntäverkossa (*RAN*). Tämä tapahtuu ottamalla käyttöön tiedon varastointi- ja prosessointikykyä omaavia välittäjäsolmuja matkapuhelinverkkojen tukiasemilla. Pilvenhattaroiden tarkoitus on tarjota pilvilaskentakapasiteettia mahdollisimman lähellä älylaitteita, tietoverkkojen reunoilla. Tämä antaa älylaitteille mahdollisuuden siirtää laskentatehoa vaativaa toimintaa pilvenhattaroille. Samankaltaista resurssien allokointia tapahtuu perinteisissä datakeskuksissa (Shahzadi ym., 2019).

Nykyisin jo valmiina olevista matkapuhelinverkoista voidaan *MEC*:n avulla jalostaa avaintekijöitä *M2M*- ja *IoT*-palvelujen mahdollistamiseksi. Nämä palvelut ovat jo kehittyneet sille tasolle, että ne voivat todistettusti muodostaa vertikaalisia segmenttejä tai palveluja, kuten apuvälineitä energian säästämiseksi, tai älykaupunki ja kulkuneuvopalveluita. Liiketoimintanäkökulmasta, *MEC*:n pitäisi tarjota tietoturvallinen pilvilaskenta-arkkitehtuuri, ja tarjota sovelluskehitysrajapintoja kolmannen osapuolen toimijoille. Niiden avulla *MEC*:n jakamisesta ja käyttämisestä tulee dynaamisempaa ja helpommin asennettavaa, ja se saadaan parempaan vuorovaikutukseen *RAN*:in kanssa. (Taleb ym., 2017.)

Sekä *5G*:n että reunalaskennan pääaspektit liittyvät niiden potentiaalihin, tukea viiveelle herkkiä ja dataintensiivisiä sovelluksia, kuten *IoT*-, kulkuneuvojen kommunikaatio-, ja puettavia *AR*-sovelluksia, ja monia muita. Tämän tyyppisiä sovelluksia on mahdollista suorittaa reunapalvelimilla, keskitetyn pilvisysteemin sijaan. Viime aikoina tällaisia sovelluksia on alettu nimittää "reuna-natiiveiksi sovelluksiksi". Lisäksi, useiden käyttäjien palveleminen samanaikaisesti, ruuhkaisella alueella, on edelleen valtava haaste palveluntarjoajille, kun palvelun laadun, täytyy olla käyttäjien hyväksymällä tasolla. Reunaprosessoinnin ja tallennuskapasiteetin integrointi *5G*-infrastruktuuriin (pääosin *5G*-tukiasemalle), tulee tarjoamaan välttämätöntä laskentakapasiteettia tulevaisuuden *5G*-sovelluksille. Nämä sovellukset voivat hyödyntää *5G*-tietoverkon suurempaa datansiirtonopeutta, edestakaiseen datansiirtoon reunalta, ja reunalta pois. Sen sijaan, että dataa ja palvelupyynnöitä lähetettäisiin keskitettyyn pilvisysteemiin, niin paikallista (engl. *local*) reunainfrastruktuuria käytetään, sovellusten vaatimien prosessointi- ja tallennusresurssien, vaatimusten täyttämiseksi. (Schwab, Hill & Jararweh, 2020.)

*5G*-tietoverkot tulevat nostattamaan helpommin ohjelmoitavia lähestymistapoja sovellusverkkojen kehitykseen, ja käyttämään IT-virtualisointitekniikkaa laajentamaan telekommunikaatioinfrastruktuuria, funktioita, ja sovelluksia. Näin ollen, *MEC* esittäytyy avainteknologiana, ja arkkitehtuurisena konseptina, mahdollistamaan *5G*:n. Se auttaa muuttamaan mobiililaajakaistaverkon, ohjelmoitavissa olevaksi maailmaksi, ja parantaa muun muassa *5G*:n skaalautuvuutta ja automaatiota. Lisäksi, se mahdollistaa innovatiivisia palveluskenaarioita,



jotka voivat varmistaa paremman käyttäjäkokemuksen, optimoidun tietoverkon operoinnin, ja samalla avata uusia liiketoimintamahdollisuuksia. (Hu ym., 2015.) MEC voi myös helpottaa useiden älykaupunkipalveluiden luomisessa. Niitä ovat esimerkiksi: liikenne- ja sijaintipalvelut, älykkäät julkiset tilat, energian säästäminen, yleinen turvallisuus- ja hätätapausapu (Taleb ym., 2017).

Multiyhteysreunalaskenta houkuttelee puoleensa uuden arvoketjun, ja ekosysteemin. Siinä kaikki pelaajat voivat hyötyä tiiviimmästä yhteispelistä. Mobiilioperaattorit ovat käänteentekevässä roolissa uudessa arvoketjussa, ja ne herättävät OTT-palveluntarjoajat (engl. *Over-The-Top providers*), sovelluskehittäjät, ja muut verkkotoimijat innovoimaan uudelaista keihäänkärkiteknologiaa. Sen jälkeen, kontekstittietoiset sovellukset, voivat toimia lähellä mobiilikuluttajia. Mobiilikuluttajat voivat nauttia ainutlaatuisesta, palkitsevasta, ja personalisoidusta mobiililaajakaistayhteyden käyttäjäkokemuksesta, joka on räätälöity käyttötärpeiden ja -mieltymysten mukaisesti (Hu ym., 2015).

Tietoturvaongelmat voivat vaikeuttaa MEC-ajatusmallin menestystä, jos niitä ei huomioida riittävän huolellisesti. Nykyiset, keskitetyt autentikointiprotokollat, eivät välttämättä ole soveltuvia, joihinkin tietoverkon osiin, jotka ovat rajallisesti yhdistettävissä pääautentikointipalvelimeen. On myös tärkeää ottaa käyttöön luottamuksenhallintajärjestelmät (engl. *trust management systems*), jotka ovat kykeneviä luottamukselliseen tiedonvaihtoon toistensa välillä, jopa silloin, vaikka niillä olisi eri verkkotunnukset (engl. *domains*) (Tran ym., 2017).

Teknisistä haasteista huolimatta, MEC tuo tullessaan myös uusia liiketoimintamahdollisuuksia, jotka mahdollistavat mobiilioperaattoreille taloudellisen hyödyn kasvattamisen, yhdistämällä pilvi- ja tietoverkkoresurssit, samoin kuin yksittäiset palvelut, kolmansille osapuolille. MEC-ratkaisujen, ja sen arkkitehtuurin kehittämisestä koituviiin taloudellisiin haasteisiin, tulee kiinnittää riittävästi huomiota. Vain siten voidaan varmistaa kestävä kilpailuympäristö, useille eri toimijoille. Myös keinoja mahdollisten taloudellisten konfliktien ratkaisemiseksi, eri osapuolten välillä, olisi järkevää pohtia, jotta MEC-systeemin kitkaton toiminta varmistuisi. (Taleb ym., 2017.)

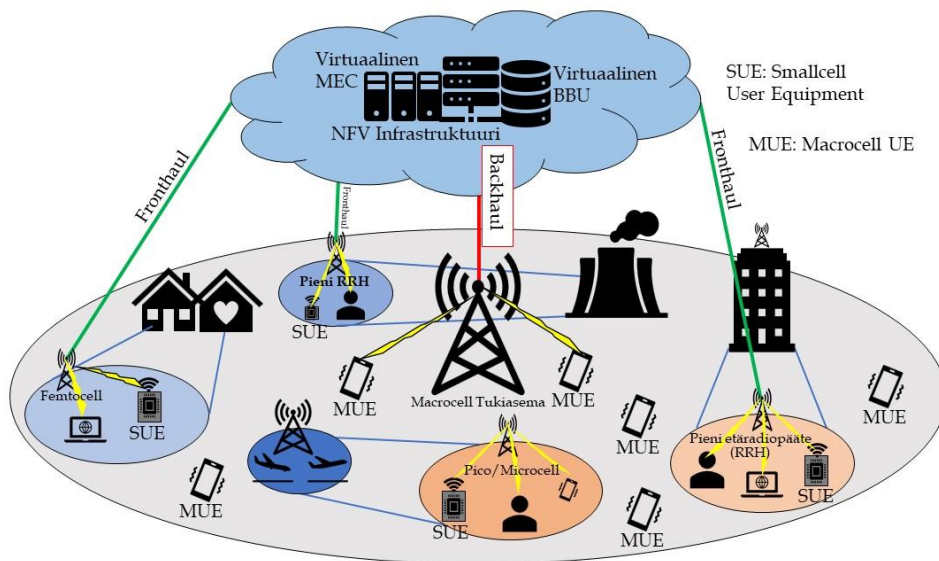
Sekä sumulaskenta että MEC, kaavailevat avointa alustaa, joilla on samankaltaisia ominaisuuksia. Sumulaskennassa keskitytään pääosin IoT-sovelluksiin, mutta myös muihin sovelluksiin, joissa hyödynnetään laskentakerrosta, joka tukee kollektiivisesti päätelaitteita. MEC taas keskittyy sovelluksiin liittyviin parannuksiin, kuten esimerkiksi palautteenantomekanismeihin, sekä informaation- ja sisällön prosessointiin ja tallentamiseen. Siinä huomioidaan ensisijaisesti yksittäiset laskenta-alustat (Taleb ym., 2017).

Perinteiseen pilvilaskentaan verrattuna, MEC:ssä on useita merkittäviä turvallisuusriskejä, erityisesti silloin, kun se on sijoitettu tukiasemalle, joka sijaitsee sellaisessa paikassa, joka on altis fyysisille hyökkäyksille. Toisin sanottuna, MEC-asennukset nostattavat ylimääräisiä turvallisuushuolia silloin, kun puhutaan tukiasemiin kohdistuvista iskuista. MEC tarvitsee myös tiukempia turvallisuuskäytäntöjä, koska kolmannen osapuolen sidosryhmät pääsevät käsiksi reunalaskenta-alustaan, ja siellä olevaan, käyttäjiä ja radioanalytiikkaa

koskevaan informaatioon. Tämän vuoksi, kolmansien osapuolten etuoikeutta lähestyä reunalaskenta-alustaa, tulisi harkita autentikoitavan (Taleb ym., 2017).

MEC-palvelimet ovat jakautuneita ja pienikokoisia. Sen vuoksi käyttäjädatta on vähemmän keskitettyä, ja on epätodennäköisempää, että MEC-systeemi joutuu tietomurron kohteeksi. Lisäksi MEC-palvelimet voivat olla yksityisomisteisia pilvenhattaroita, mikä helpottaa mahdollisten informaatiovuotojen alkuperän selvittämistä. Näin ollen, sellaiset palvelut, jotka vaativat arkaluontoisen informaation vaihtoa palvelimen ja loppukäyttäjän välillä, voivat hyötyä MEC:stä (Liu ym., 2020). MEC tarjoaa suuren määrän potentiaalia ja mahdollisuuksia. Tästä huolimatta, on olemassa joitakin siihen liittyviä jatkotutkimushaasteita. Niitä ovat esimerkiksi resurssienhallinta, mobiliteetti ja luotettavuus, tietoverkon integroitavuus ja sovelluskehityksen siirrettävyys, datan yksityisyys, ja tietoturva (Pham, Fang ym., 2020).

On olemassa kolmenlaisia MEC-käyttötapauksia: kuluttajaorientoituneita palveluita, operaattoreiden- ja kolmannen osapuolen toimijoiden palveluita, sekä tietoverkon suorituskyvyn ja käyttäjäkokemuksen parannuksia. MEC:n integrointi 5G-tietoverkon kanssa on oleellista, edellä mainittujen kategorisointien tukemiseksi (Pham ym., 2020).



KUVIO 3. H-CRAN MEC-arkkitehtuuri, vapaasti suomennettuna esimerkiksi: Multiyhteys-reunalaskenta-arkkitehtuuri heterogeenisessä pilviradioliityntäverkossa. (Mukaiillen: Pham ym. (2020) kuviota "Figure 10", artikkelissa: "A survey of multiaccess edge computing in 5G and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of the-art", sivulla 26.)

## 8 Yhteenveto

Tulevaisuuden tietoverkkoihin viitataan usein lyhenteellä 5G. (Sultan & Ali, 2017). 5G on vielä tällä hetkellä varhaisessa vaiheessa (Chen, Zhang, Hu, Taleb & Sheng, 2015). Sen Pää tavoitteina on kuitenkin parantaa luotettavuutta, energiatehokkuutta ja kapasiteettia. Samaan aikaan, yhteyden tiheys kasvaa ja viive lyhenee (Liu ym., 2020).

Almubaddelin & Elmogyn (2016) mukaan Pilvilaskenta (CC) on laskentapalvelujen välittämistä internetissä. Mobiilipilvilaskenta (MCC) voidaan ajatella pilvilaskennan ominaisuuksien laajenuksena mobiililaskentaympäristössä (Taleb ym., 2017). Tämän hetkisten radioliityntäverkkojen (RAN) rajoitteiden häivyttämiseksi, on esitelty kaksi orastavaa ajatusmallia:

- Pilviradioliityntäverkko (C-RAN), jonka tavoitteena on keskittää tukiasemien (engl. *Base Station/BS*) funktiot, virtualisoinnin avulla.
- Mobiilireunalaskenta (MEC), ehdottaa tietoverkon reunan (engl. *edge*) laskentatehon voimistamista.

Vaikka nämä kaksi teknologiaa, haluavat kumpikin siirtää laskentakapasiteettia eri suuntiin (reunalle *vs.* pilveen), niin ne täydentävät toisiaan, ja niillä molemmilla on omaleimaiset positiot, viidennen sukupolven informaatioteknologiaekosysteemissä. (Tran, Hajisami, Pandey & Pompili, 2017.)

Yksi mahdollisuus radioliityntäverkoissa (RAN) tapahtuvan prosessoinnin keskittämiseen on siis C-RAN-tyyppinen ratkaisu. Siinä etäohjattavat radiopäätteet, on yhdistetty datakeskukseen, valokuitukaapeleiden avulla (Liu ym., 2020). Jos pienten multi-radio-solujen (engl. *multi-radio small cells*) levittämisestä tiheään, tulee valtavirtaa, kun suunnataan kohti 5G:tä, niin rahalliset-, ja operationalliset kustannukset, tulevat kasvamaan merkittävästi (Shorgin ym., 2014).

Tämän kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan olettaa, että pilvilaskenta tulee muuttumaan 5G-aikakaudella sumu- ja reunalaskennaksi. Kun yhä enemmän virtuaalisia tietoverkon toimintoja suoritetaan sumulaskentaympäristössä, niin mahdollistuu uudenlaisia palveluparadigmoja, kuten *XaaS* (engl. *Anything as a Service*). (Kitanov & Janevski, 2017).

Pilvilaskenta (CC) perustuu sosiaaliseen ja julkiseen pilveen, ja IT-operaattorien tarjoamiin palveluihin, kun taas sumulaskenta (FC) perustuu useisiin pienempiin, yksityisten käyttäjien ja yritysten pilviin. Pilvilaskenta koostuu tyypillisesti korkean suorituskyvyn omaavien laskentalaitteiden klustereista, kun sumulaskennassa työtehtäviä keskitetään enemmän yksittäisille tietokoneille, joista jokaisella on oma funktionsa järjestelmässä. (Jiang ym., 2020.)

Mobiilireunalaskenta (engl. *Mobile Edge Computing/MEC*), Sumulaskenta (FC) ja pilvihattaralaskenta (engl. *Cloudlet Computing/CC*), ovat erilaisia keinoja, reunakerroksen implementointiin. (Shahzadi, Niaz, Ali, Naeem, Rodrigues, Joel, Qamar & Anwar, 2019). Sumuverkon heterogeenisuus johtuu sen sijainnista, tietoverkon reunalla. Tästä syystä sumuverkon päätehtäviä ovat datan keräminen, ja yhteyden ylläpito sumusolmujen (FN) kanssa. Kolme pääskenaariota, jotka hyötyvät sumulaskennasta eniten, ovat lisätty todellisuus (AR), sisällön jakelu IoT-laitteille ja Big-Data-analytiikka. (Shahzadi ym., 2019.)

Multiyhteysreunalaskentaa (engl. *Multi-access Edge Computing/MEC*) voidaan pitää mobiilipilvilaskennan (MCC) evoluutiona (Liu ym., 2020). Se on kasvava ekosysteemi, jonka tavoitteena on konvergoida telekommunikaatio- ja IT-palveluja, tarjoamalla pilvilaskenta-alusta radioliityntäverkon reunalla. MEC tarjoaa tallennustilaa ja laskennallista suorituskykyä, mikä laskee mobiilikäyttäjien latenssia ja hyödyntää tehokkaammin mobiilirunkoliityntäyhteyttä ja kantaverkkoja. (Taleb ym., 2017.) Muiden reunalaskenta-ajatusmallien, kuten pilvenhattaroiden (*Cloudlets*) ja sumulaskennan (FC) ohella, MEC voidaan ajatella siltana, lukuisten IoT-laitteiden ja keskitetyn pilven välillä (Liu ym., 2020).

Lopuksi, tämän kirjallisuuskatsauksen tuloksia on vielä koottu SWOT-nelikenttää (engl. *Strengths, Weaknesses, Opportunities & Threats*) mukailevaan taulukkoon. Taulukon jaottelua on muutettu niin, että se soveltuu käsittelemään pilvi-, sumu-, ja reunalaskennan, hyötyjä, haasteita, mahdollisuuksia ja haittoja, 5G-aikakaudella.

| <b>Pilvi-, sumu- ja reunalaskenta 5G-aikakaudella:</b> |  |   |               |  |
|--|--|---|---------------|--|
| <b>Lähde:</b>  | <b>Hyötyjä:</b>  | <b>Haasteita:</b>   | <b>Lähde:</b> |  |
| 16   | • Parempi käyttäjäkokemus  | • Energiankulutus   | 11            |  |
| 15   | • Korkeampi QoS  | • Datamäärän kasvu  | 9             |  |
| 15   | • Ultra-HD-video   | • Tietoturva  | 16            |  |
| 11   | • Suurempi datansiirtonopeus   | • RAN-yhteensopivuus  | 6             |  |
| 11   | • Matalampi latenssi   | • Standardisointi   | 2             |  |
| 11   | • Suurempi datakapasiteetti  | • OPEX  | 1             |  |
| 11   | • Laajempi langaton alue   | • CAPEX   | 1             |  |
| 5  | • Varmuuskopiointi   | • Markkinointi  | 7             |  |
| 16   | • Millimetriaaltokommunikaatio   | • Hallinnointi  | 13            |  |
| 16   | • Ultra-large-scale antenna  | • Uudelleenohjelmoitavuus   | 14            |  |
| 16   | • Advanced beamforming   | • Laskennalliset vaatimukset  | 7             |  |
| 16   | • Full-duplex wireless   | • Langattomuus  | 16            |  |
| 16   | • Compressed network processing  | • Mobiliteetti  | 7             |  |
| <b>Lähde:</b>  | <b>Mahdollisuuksia:</b>  | <b>Haittoja:</b>  |               |  |
| 8  | • Interaktiiviset sovellukset  | <p>• 5G on jossain määrin, kaupallisten toimijoiden lanseeraama termi, joka vähättelee aikaisempien sukupolvien (kuten 3G ja 4G) potentiaalia (Suryanegara ym., 2017).</p> <p>• Monimutkaisempi sovelluskehitys (Rao &amp; Prasad, 2018).</p> <p>• Hiilijalanjälki (Das, ym., 2019).</p> <p>• Valokuitukaapeliverkkoja on kallista rakentaa, ja ylläpitää (Wubben, ym., 2014).</p> <p>• Monimutkaisempi arkkitehtuuri (Rao &amp; Prasad, 2018).</p> |               |  |
| 3  | • VR   |   |               |  |
| 3  | • AR   |   |               |  |
| 10   | • Big Data   |   |               |  |
| 12   | • AI   |   |               |  |
| 3  | • IoT  |   |               |  |
| 15   | • Älykäs Terveystenhoito   |   |               |  |
| 14   | • Älykaupunki  |   |               |  |
| 14   | • Älykkäät rakennukset   |   |               |  |
| 14   | • Älykäs sähköverkko   |   |               |  |
| 14   | • Älykäs liikenteenohjaus  |   |               |  |
| 14   | • Älykkäät kulkuneuvot   |   |               |  |
| 4  | • Liiketoiminta  |   |               |  |
| 4  | • Innovaatiot  |   |               |  |
| <b>Taulukon lähdeviitteet:</b>                         |  |   |               |  |
|  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alvarez, Breitgand ym., 2019</li> <li>2. Andrews, Buzzi, Choi, Hanly, Lozano, Soong &amp; Zhang, 2014</li> <li>3. Ding &amp; Janssen, 2018</li> <li>4. Huazhang, Zhonghao &amp; Shuai, 2019</li> <li>5. Jiang, Li, Tian &amp; Al-Nabhan, 2020</li> <li>6. Kaur &amp; Moh, 2018</li> <li>7. Kitanov &amp; Janevski, 2017</li> <li>8. Pang, Hao, Park &amp; Maio, 2020</li> <li>9. Peng, Li, Zhao &amp; Wang, 2015</li> <li>10. Peralta, Garrido, Bilbao, Agüero &amp; Crespo, 2019</li> <li>11. Rao &amp; Prasad, 2018</li> <li>12. Shim, Van den Dam, Aiello, Penttinen, Sharda &amp; French, 2020</li> <li>13. Shorgin, Samouylov, Gudkova, Galinina &amp; Andreev, 2014</li> <li>14. Taleb, Samdanis, Mada, Flinck, Dutta &amp; Sabella, 2017</li> <li>15. Tran, Hajisami &amp; Pompili, 2017</li> <li>16. Wang, 2020</li> </ol> |   |               |  |

Taulukko 1. "Pilvilaskenta 5G-aikakaudella" -kirjallisuuskatsauksen synteesiä, SWOT-analyysia mukaillen (Kinnunen, 2020).

## LÄHTEET

- Ahmad, I., Kumar, T., Liyanage, M., Okwuibe, J., Ylianttila, M., & Gurtov, A. (2018). Overview of 5G security challenges and solutions. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2, 36-43.  
doi:10.1109/mcomstd.2018.1700063 Retrieved from  
<https://search.datacite.org/works/10.1109/mcomstd.2018.1700063>
- Almubaddel, M., & Elmogy, A. (2016). Cloud computing antecedents, challenges, and directions. *Proceedings of the International Conference on Internet of things and Cloud Computing (ICC '16)*, Article 16, 1-5.  
doi:10.1145/2896387.2896401 Retrieved from  
<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2896401>
- Alvarez, F., Breitgand, D., Griffin, D., Andriani, P., Rizou, S., Zioulis, N., . . . Jimenez, D. (2019). An edge-to-cloud virtualized multimedia service platform for 5G networks. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 65(2), 369-380.  
doi:10.1109/tbc.2019.2901400
- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., & Zhang, J. C. (2014). What will 5G be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6), 1065-1082. doi:10.1109/jsac.2014.2328098
- Barbarossa, S., Sardellitti, S., & Di Lorenzo, P. (2014). Communicating while computing: Distributed mobile cloud computing over 5G heterogeneous networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 31, 45-55.  
doi:10.1109/msp.2014.2334709 Retrieved from  
<https://search.datacite.org/works/10.1109/msp.2014.2334709>
- Basin, D., Dreier, J., Hirschi, L., Radomirovic, S., Sasse, R., & Stettler, V. (2018). A formal analysis of 5G authentication. *Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '18)* 1383-1396. doi:10.1145/3243734.3243846 Retrieved from  
<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3243846>
- Bassoli, R., Di Renzo, M., & Granelli, F. (2017). Analytical energy-efficient planning of 5G cloud radio access network. *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, 2017, pp. 1-4,  
doi:10.1109/ICC.2017.7996871 Retrieved from  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7996871>

- Chaudhary, R., Kumar, N., & Zeadally, S. (2017). Network service chaining in fog and cloud computing for the 5G environment: Data management and security challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(11), 114-122. doi:10.1109/MCOM.2017.1700102
- Chen, M., Zhang, Y., Hu, L., Taleb, T., & Sheng, Z. (2015). Cloud-based wireless network: Virtualized, reconfigurable, smart wireless network to enable 5G technologies. *Mobile Networks and Applications*, 20(6), 704-712. doi:10.1007/s11036-015-0590-7
- Chimeh, D. J. (2020). Compelling services for 5G creation. *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, Seoul, Korea (South), 2020, pp. 1-6, doi:10.1109/WCNCW48565.2020.9124735 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9124735>
- Das, D., Bapat, J., & Das, D. (2019). Power saving with capacity augmentation for sustained QoS in 5G cloud RAN. *IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, Bangalore, India, 2019, pp. 1-5, doi:10.1109/CONECCT47791.2019.9012924 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9012924>
- Ding, A., & Janssen, M. (2018). Opportunities for applications using 5G networks. *Proceedings of the Seventh International Conference on Telecommunications and Remote Sensing (ICTRS '18)*. 27-34. doi:10.1145/3278161.3278166 Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3278166>
- French, A. M., & Shim, J. P. (2016). The digital revolution: Internet of things, 5G and beyond. *Communications of the Association for Information Systems*, 38, 840-850. doi:10.17705/1CAIS.03840
- Houatra, D., & Tseng, Y. (2018). Monitoring 5G radio access networks with cloud-based stream processing platforms. *2018 21st Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops (ICIN)*, pp. 1-5. doi:10.1109/ICIN.2018.8401581 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/8401581>
- Hu Y. C., Patel M., Sabella D., Sprecher N. & Young V., (2015). Mobile Edge Computing - a key technology towards 5G. *ETSI White Paper No. 11*.
- Huazhang, L., Zhonghao, Z., & Shuai, G. (2019). 5G edge cloud networking and case analysis. *2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)* pp. 617-621. doi:10.1109/ICCT46805.2019.8947289 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/8947289>

- Jiang, J., Li, Z., Tian, Y., & Al-Nabhan, N. (2020). A review of techniques and methods for IoT applications in collaborative cloud-fog environment. *Security and Communication Networks*, 2020, 1-15. doi:10.1155/2020/8849181
- Kaur, G., & Moh, M. (2018). Cloud computing meets 5G networks. *Proceedings of the ACMSE 2018 Conference (ACMSE '18)*, Article 21, 1-8. doi:10.1145/3190645.3190674 Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3190674>
- Kitanov, S., & Janevski, T. (2017). Energy efficiency of fog computing and networking services in 5G networks. *IEEE EUROCON 2017 -17th International Conference on Smart Technologies, Ohrid, 2017*, pp. 491-494 doi:10.1109/EUROCON.2017.8011159 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/8011159>
- LaBuda, R. J. & Gillespie, M. H., (2017). The Internet of Things: Current Issues and Future Problems. *SAIS 2017 Proceedings*. 24. <http://aisel.aisnet.org/sais2017/24>
- Liu, Y., Peng, M., Shou, G., Chen, Y., & Chen, S. (2020). Toward edge intelligence: Multiaccess edge computing for 5G and internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(8), 6722-6747. doi:10.1109/JIOT.2020.3004500
- Lopez-Pires, F., & Barán, B. (2018). Machine learning opportunities in cloud computing data center management for 5G services. *2018 ITU Kaleidoscope: Machine Learning for a 5G Future (ITU K)*. pp. 1-6. doi:10.23919/ITU-WT.2018.8597920 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/8597920>
- Okoli, C., Schabram, K. (2010). "A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research," . *Sprouts: Working Papers on Information Systems*, 10(26). <http://sprouts.aisnet.org/10-26>
- Onireti, O., Qadir, J., Imran, M., & Sathiseelan, A. (2016). Will 5G see its blind side? evolving 5G for universal internet access. *Proceedings of the 2016 workshop on Global Access to the Internet for All (GAIA '16)*. pp. 1-6. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2940158>
- Pang, B., Hao, F., Park, D., & Maio, C. D. (2020). A multi-criteria multi-cloud service composition in mobile edge computing. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, 12(18), 7661. doi:10.3390/su12187661
- Peng, M., Li, Y., Zhao, Z., & Wang, C. (2015). System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Network*, 29(2), 6-14. doi:10.1109/mnet.2015.7064897



- Pham, Q., Fang, F., Ha, V. N., Piran, M. J., Le, M., Le, L. B., . . . Ding, Z. (2020). A survey of multiaccess edge computing in 5G and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art. *IEEE Access*, 8, 116974-117017. doi:10.1109/ACCESS.2020.3001277
- Peralta, G., Garrido, P., Bilbao, J., Agüero, R., & Crespo, P. M. (2019). Fog to cloud and network coded based architecture: Minimizing data download time for smart mobility. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 101, 102034. doi:10.1016/j.simpat.2019.102034
- Rad, B., Diaby, T., & Rana, M. (2017): Cloud computing adoption: A Short Review of Issues and Challenges. *Proceedings of the 2017 International Conference on E-commerce, E-Business and E-Government (ICEEG 2017)*. pp. 51-55. doi:10.1145/3108421.3108426 Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3108426>
- Rao, S. K., & Prasad, R. (2018). Impact of 5G technologies on smart city implementation. *Wireless Personal Communications*, 100(1), 161-176. doi:10.1007/s11277-018-5618-4
- Rost, P., Bernardos, C. J., Domenico, A. D., Girolamo, M. D., Lalam, M., Maeder, A., . . . Wübben, D. (2014). Cloud technologies for flexible 5G radio access networks. *IEEE Communications Magazine*, 52(5), 68-76. doi:10.1109/MCOM.2014.6898939
- Sarvabhatla, M., Konda, S., Vorugunti, C. S., & Babu, M. M. N. (2017). A network aware energy efficient offloading algorithm for mobile cloud computing over 5G network. *2017 IEEE International Conference on Cloud Computing in Emerging Markets (CCEM)* pp. 69-74. doi:10.1109/CCEM.2017.17 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/8332558>
- Satyanarayanan, M., Bahl, V., Caceres, R., & Davies, N., (2009) "The case for VM-based cloudlets in mobile computing," *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 8, no. 4, pp. 14-23, Oct.-Dec. 2009.
- Schwab, J., Hill, A., & Jararweh, Y. (2020). Edge computing ecosystem support for 5G applications optimization. *Proceedings of the 21st International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (HotMobile '20)*. pp. 103. doi:10.1145/3376897.3379166 Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3379166>
- Shahzadi, R., Niaz, A., Ali, M., Naeem, M., Rodrigues, Joel J. P. C, Qamar, F., & Anwar, S. M. (2019). Three tier fog networks: Enabling IoT/5G for latency sensitive applications. *China Communications*, 16(3), 1-11. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/8673718>

- Shim, J.P.; Van den Dam, R; Aiello, S; Penttinen, J; Sharda, R; and French, A, "5G Technologies: Insights, Opportunities & the Future" (2020). *AMCIS 2020 Proceedings* 3.
- Shorgin, S., Samouylov, K., Gudkova, I., Galinina, O., & Andreev, S. (2014). On the benefits of 5G wireless technology for future mobile cloud computing. *2014 International Science and Technology Conference (Modern Networking Technologies) (MoNeTeC)*. pp. 1-4. doi:10.1109/MoNeTeC.2014.6995601 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/6995601>
- Singh, S., Chiu, Y., Tsai, Y., & Yang, J. (2016). Mobile edge fog computing in 5G era: Architecture and implementation. *2016 International Computer Symposium (ICS)*. pp. 731-735. doi:10.1109/ICS.2016.0151 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/7858573>
- Sultan, K., & Ali, H. (2017). Where big data meets 5G? *Proceedings of the Second International Conference on Internet of things, Data and Cloud Computing (ICC '17)*. pp. 1-4. doi:10.1145/3018896.3025151 Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3025151>
- Suryanegara, M., Arifin, A., & Asvial, M. (2017). The IoT-based transition strategy towards 5G. *Proceedings of the International Conference on Big Data and Internet of Thing (BDIOT2017)*. pp. 186-190. doi:10.1145/3175684.3175728 Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3175728>
- Taleb, T., Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., & Sabella, D. (2017). On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 19(3), 1657-1681. doi:10.1109/comst.2017.2705720
- Tran, T. X., Hajisami, A., Pandey, P., & Pompili, D. (2017). Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55, 54-61. doi:10.1109/mcom.2017.1600863 Retrieved from <https://search.datacite.org/works/10.1109/mcom.2017.1600863>
- Tran, T. X., Hajisami, A., & Pompili, D. (2017). Cooperative hierarchical caching in 5G cloud radio access networks. *IEEE Network*, 31(4), 35-41. doi:10.1109/mnet.2017.1600307
- Wang, T. (2020). Application of edge computing in 5g communications. IOP Conference Series. *Materials Science and Engineering*, 740, 12130. doi:10.1088/1757-899X/740/1/012130

- Webster, J., & Watson, R. (2002). Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. *MIS Quarterly*, 26(2), Xiii-Xxiii. Retrieved December 6, 2020, from <http://www.jstor.org/stable/4132319>
- Wubben, D., Rost, P., Bartelt, J. S., Lalam, M., Savin, V., Gorgoglione, M., . . . Fettweis, G. (2014). Benefits and impact of cloud computing on 5G signal processing: Flexible centralization through cloud-RAN. *IEEE Signal Processing Magazine*, 31, 35-44. doi:10.1109/msp.2014.2334952 Retrieved from <https://search.datacite.org/works/10.1109/msp.2014.2334952>
- Zhang, N., Cheng, N., Gamage, A. T., Zhang, K., Mark, J. W. & Shen, X.. (2015) Cloud Assisted HetNets Toward 5G Wireless Networks. *IEEE Communications Magazine – Communications Standards Supplement*.