

Jani Harju

Viive Azuren pilvipalveluun matalan viiveen yhteyksillä

Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

10. huhtikuuta 2022

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Jani Harju

Yhteystiedot: jamaharj@jyu.fi

Ohjaajat: Hämäläinen Timo ja Immonen Riku

Työn nimi: Viive Azuren pilvipalveluun matalan viiveen yhteyksillä

Title in English: Latency to Azure's cloudservices with low latency connections

Työ: Pro gradu -tutkielma

Opintosuunta: Tietotekniikka

Sivumäärä: 50+2

Tiivistelmä: Verkkoon liitettyjen IoT-laitteiden määrä kasvaa jatkuvasti. Tarvitaan nopeampia tiedonsiirtoyhteyksiä siirtämään dataa laitteiden ja niitä ohjaavien pilvipalveluiden välillä. Matalan viiveen tekniikoita onkin markkinoilla tarjolla monia, kuten 5G, LTE-M, LTE, jne. Tässä Pro-gradu tutkielmassa tarkastellaan Microsoftin Azurea, joka on yksi tämän hetken johtavista pilvipalvelu alustoista. Tähän tehdään myös hakua verkosta tällä hetkellä löytyvistä 5G, LTE-M ja Wi-Fi 5/6 yhteydellä löytyvistä IoT-laitteista. Tutkielman pääkohde keskittyy matalan viiveen yhteyden mittaamiseen IoT-laitteen ja Azuren pilvipalvelun välillä.

Avainsanat: 5G, Azure, IoT

Abstract: The amount of IoT-devices that are connected to the internet is continuously increasing. Faster data connections are needed to transfer data between devices and the cloud services that control them. There are many low-latency technologies available on the market, such as 5G, LTE-M, LTE, etc. This Master's thesis studies Microsoft's Azure, one of the leading cloud service platforms today. This is also done by searching the 5G, LTE-M and Wi-Fi 5/6 IoT devices currently available on the network. The main topic of the thesis focuses on measuring the low latency connection between an IoT device and the Azure cloud service.

Keywords: 5G, Azure, IoT

Termiluettelo

5G	Viidennen sukupolven matkapuhelinverkkotekniikka.
Azure	Microsoftin julkinen pilvipalvelu
BLE	Bluetooth Low Energy on lyhyen kantaman langaton verkko-tekniikka.
Downlink	Verkkoyhteyksissä pakettien lähetys ydinverkosta päätelaitteelle.
IEEE 802.11ac	Toiselta nimeltään Wi-Fi 5 on langaton WLAN verkkostandardi.
IEEE 802.11ax	Toiselta nimeltään Wi-Fi 6 on langaton WLAN verkkostandardi.
IIoT	Industrial Internet of Things eli teollinen esineiden internet. Teolliset järjestelmät, jotka liittävät teollisia moottoreita, koneita ym. verkkoon.
Ilmaviive	Signaalin lähettämisen ja vastaanottamiseen kulunut aika langattomassa yhteydessä.
Input	Syöte, jonka tarkoitus tuottaa jokin vaste tai tuloste.
IoT	Internet of Things eli esineiden internet. Järjestelmiä, jotka levittävät itsestään tietoja verkon yli ilman ihmisen osallistumista siihen.
JSON	Tiedostomuoto.
Kaistanleveys	Kertoo paljonko dataa voidaan lähettää toiseen pisteeseen tietyssä aikayksikössä. Yksikkönä käytetään bps eli bittiä/sekunti.
Levityskerroin	Spreading Factor(SF) eli Lora tekniikan kantoaallon nopeuskerroin arvolta 7-12. Matalempi SF tarkoittaa nopeampaa tiedonsiirtonopeutta.
LoRaWAN	LoRa-Alliance:n luoma langaton tiedonsiirtoprotokolla.
LPWAN	Low-Power-Wide-Area-Network on langattomien verkkojen verkoarkkitehtuurimuoto.
LTE-M	Long Term Evolution for Machines on neljännen sukupolven

	matkapuhelinverkkotekniikka.
Matala viiveinen yhteys	Low latency eli yhteys, jossa verkon viive on 1000 - 1 ms.
MEC	Mobile Edge Computing eli verkkoarkkitehtuurimalli, joka on ns. avonainen RAN malli. Mahdollistaa reunalaskennan toteuttamisen.
NB-IoT	Narrowband-IoT on langaton LPWAN verkkotekniikka.
Output	Vaste tai tuloste, joka on tuotettu jonkin syötteen perusteella.
Pilvipalvelu	Palvelu, joka toteutetaan käyttäjälle verkon yli.
Python	Ohjelmointikieli.
QoS	Quality of Service eli mekanismit, jotka vaikuttavat palvelun laadun varmistamiseen kriittisissä sovelluksissa.
RAN	Radio Access Network eli verkkoarkkitehtuuri, joka yhdistää langattoman laitteen ja ydinverkon välillä ja yhdistää ne toisiinsa.
Reunalaskenta	Datan prosessointi, joka tapahtuu verkon reunalla lähellä palvelun käyttäjää.
Sigfox	Sigfox yhtiön luoma langaton tiedonsiirtoprotokolla.
SQL	Kyselykieli relaatiotietokannalle.
Uplink	Verkkoyhteyksissä pakettien lähetys päätelaitteelta ydinverkolle.
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication eli erittäin luotettava matalan viiveen yhteys, jossa verkon viive on alle 1 ms.
Verkon viive	Aikayksikkö millisekunteina(ms), joka mittaa verkossa kulunutta aikaa datan lähetyksen lähtöpisteestä vastauksen saamiseen päätepisteeltä.
Viive	Aikayksikkö millisekunteina(ms), joka mittaa verkossa kulunutta aikaa datan lähtö- ja päätepisteen välillä.

Kuviot

Kuvio 1. O-RAN yksinkertaistettu arkkitehtuuri(“Opening the RAN” 2022).....	7
Kuvio 2. MEC-arkkitehtuuri (Dario Sabella ym. 2016)	8
Kuvio 3. Azure:n esimerkinomainen käyttö IIoT arkkitehtuurissa (“Low-latency network connections for industry” 2021).....	15
Kuvio 4. Azure Stack Edge (“Azure Stack Edge Pro” 2020).....	16
Kuvio 5. Qualcomm Flight™ RB5 5G Platform.....	22
Kuvio 6. Hololens 2(“Hololens 2” 2022)	24
Kuvio 7. Raspberry Pi 4 B tietokone(“Raspberry Pi 4 Computer Model B” 2021)	27
Kuvio 8. Viestiketjuun osallistuvat pääkomponentit.....	28
Kuvio 9. Stream Analytics job ja datan ohjaus kyselyllä	29
Kuvio 10. Tutkimuksen SQL-kysely Azuren tietokannassa	31
Kuvio 11. Esineiden internetin langattomat verkkotekniikat etäisyyden mukaan jaoteltuna	32
Kuvio 12. Esineiden internetin langattomat verkkotekniikat viiveen mukaan jaoteltuna ...	35
Kuvio 13. Python koodi simuloitulle IoT-datalle.....	45
Kuvio 14. Tutkimuksen simuloinnin tulokset	46

Sisällys

1	JOHDANTO	1
2	KESKEISIÄ KÄSITTEITÄ 5G:SSÄ	2
2.1	Esineiden internet	2
2.2	5G-verkot	3
2.3	Reunalaskenta	5
2.4	O-RAN.....	6
2.5	MEC	7
3	ESINEIDEN INTERNETIN TIEDONSIIRTOTEKNIIKAT	9
3.1	LoRaWAN	9
3.2	Sigfox	10
3.3	NB-IoT.....	11
3.4	LTE-M	12
3.5	BLE	13
4	AZURE.....	14
4.1	Azure reunalaskenta arkkitehtuurissa	14
4.2	Azure Stack Edge	16
4.3	Azure Network Function Manager	17
4.4	Azure komponentteja reunalaskenta arkkitehtuurissa	17
5	MATALAN VIIVEEN IOT-LAITTEET MARKKINOILLA.....	20
5.1	5G IoT-alustat	20
5.2	LTE-M IoT-alustat.....	22
5.3	Wifi-5/6-alustat	23
5.4	5G IoT:n nykytilanne.....	25
6	TUTKIMUKSEN TOTEUTUS	26
6.1	Komponentit ja tekniikat.....	26
6.2	Simuloinnin toiminnallisuus	27
6.3	Viiheet muissa langattomissa verkoissa	30
6.4	Tulokset ja analyysi	36
7	YHTEENVETO.....	38
	LÄHTEET	39
	LIITTEET.....	45
	A Python koodi simuloitulle IoT-laitteelle	45
	B Simuloinnin tulokset	46

1 Johdanto

5G-verkko leviää vauhdilla maailmalla aikomuksena vastata ihmiskunnan yhä suurempaan datan kulutuksen tarpeeseen. Big Data 3V-mallin mukaisesti datan määrä kasvaa kun sitä tallentavien laitteiden määrät kasvavat, dataa tulee yhä nopeammalla tahdilla ja data on yhä monimuotoisempaa aina videoista tekstimuotoon jne. Esineiden internet on yksi osa tämän datamäärän räjähdysmäiseen kasvuun, jonka odotetaan kasvavan eksponentiaalisesti 2020-luvulla. 5G-verkon kehityksestä odotetaankin vauhdittajaa esineiden internetin ja teollisuuden esineiden internetin kehitykseen. Kuitenkin nyt, kun vasta 5G-verkkoja ollaan rakentamassa puhutaan myös alan ihmisten keskuudessa myös jo 6G-verkoista, koska näiden nopeiden yhteyksien odotetaan mullistavan maailmaa todenteolla. Itseohjautuvat ajoneuvot, terveydenhuollon leikkausrobotit ja muut kriittiset järjestelmät tarvitsevat nopeita langattomia tietoliikenneyhteyksiä toimiakseen vaaditulla tarkkuudella ja nopeudella sillä viivet tiedonsiirrossa voivat aiheuttaa kohtalokkaita seurauksia.

Teoriaosassa kappaleessa 2 tutustutaan muutamisiin käsitteisiin reunalaskentaarkkitehtuurissa ja reunalaskentakäsitteeseen itsessään sekä 5G-verkosta osana tätä arkkitehtuuria. Valmiita pilvipalvelualustoja, jotka tarjoavat mahdollisuudet esineiden internetin sovellusten luomiseen löytyy useita, joista GoogleCloud, AWS ja Azure lienevät alan ihmisille tutuimmat. Tämän työn toisessa teoriakappaleessa 4 tehdään yleiskatsaus tässä Pro gradu työssä käytettyyn Microsoftin Azure pilvipalveluun sekä tutustutaan lyhyesti pieneen osaan sen yli 200:sta sisältämästä työkaluista, jotka voisivat teoriassa olla osana yhtä esineiden internetin järjestelmää. Viimeisessä teoria kappaleessa 5 tehdään etsintä hakukoneella verkosta tämän hetkisistä markkinoilla olevista IoT-laitteista tarkoituksena löytää testattava järjestelmä gradun aiheeksi, joka voitaisiin liittää osaksi Azure:n pilvipalveluita.

Esineiden internetissä langattomia matalan viiveen tekniikoita löytyy monia. LTE-M, 5G, LTE ym. yhteydet tarjoavat nopeaa tiedonsiirtoa. Tämän gradun tutkimusosassa käydään läpi IoT-laitteen ja Azuren pilvipalvelun välistä viivettä matalan viiveen sovellutuksessa. Viive mitataan paketin lähettämisestä sen saapumiseen Azuren palveluun ja selvitetään miten matalaan viiveeseen voidaan päästä teoreettisessa esineiden internetin sisäilmamittarijärjestelmässä.

2 Keskeisiä käsitteitä 5G:ssä

Tässä luvussa kuvaillaan tämän Pro gradu työn osalta keskeisimmät käsitteet ja arkkitehtuuriratkaisut. Luvussa 2.1 käsitellään lyhyesti esineiden internetin alkuperää ja määritelmää sekä siihen liittyvää teollisuuden esineiden internetin määritelmää. Luvussa 2.2 käsitellään yleisellä tasolla 5G-verkon vaatimukset, tavoitteet ja hyödyt. Luvussa 2.3 perehdytään reunalaskennan käsitteeseen ja luvuissa 2.4 ja 2.5 reunalaskennan arkkitehtuuriratkaisuihin 5G-verkoissa sekä myös niitä edeltävää historiaa.

2.1 Esineiden internet

Esineiden internet on vasta nyt nousemassa suurempaan rooliin uusimmissa sovellutuskohdeissa 5G-teknologian myötä vaikka sen käsite esitettiin ensimmäisen kerran Kevin Ashtonin toimesta jo vuonna 1999. Hänen esittämänsä alkuperäisen idean mukaan oli "mahdollistaa verkkoon liitettyjen laitteiden levittää itsestään tietoja fyysisistä asioista verkosta kautta" (Hassan, Ali ja Badawy 2015). Vaikka "esineiden" määritelmälle on useita tulkintoja, pääasiallinen merkitys on pysynyt vuosien saatossa samana eli tietokoneella/esineellä pyritään tuottamaan järjestelmällistä tietoa ilman ihmisen väliintuloa (Gubbi ym. 2013). "Esineillä" tässä yhteydessä tarkoitetaan melkein mitä tahansa (koneet, kännykät, autot jne.) asiaa, joka voi olla yhteydessä internetiin älykkäästi, yksityisesti ja itsenäisesti. Tällä haetaankin meille arkipäiväisten asioiden/esineiden muuttamista älykkäiksi versioiksi alkuperäisestä versiostaan (Hassan, Ali ja Badawy 2015).

Ajan saatossa ollaan nähty kolme niin sanottua teollista vallankumousta, jotka ovat mekaaniseen tuotantoon perustuva tuotanto vesi- ja höyryvoimalla, joukkotyövoima ja sähköenergian käyttö sekä sähköinen automatisoitutuotanto. Neljättä vallankumoukskäsitettä hahmoteltiin jo vuonna 2011 Saksassa, mutta käsite "teollinen internet", johtaa juurensa Yhdysvaltoihin. Teollisen esineiden internetin eli IIot:n (Industrial Internet of Things) voidaan sanoa olevan järeämpi versio esineiden internetistä. Sen voidaan sanoa yhdistävän teollisuuden puolen koneita kuten moottoreita ja sähköverkkoja pilveen verkon kautta sekä kerätä, vaihtaa ja analysoida tietoa, jotta ne voivat muuttaa omaa käyttäytymistään ilman ihmisen osallistu-

mista päätöksen tekoon (Boyes ym. 2018). Boyles ym. määrittelevätkin IIoT:n artikkelissaan (Boyes ym. 2018) seuraavin sanoin:

"Järjestelmä, joka sisältää verkotettuja älykkäistä esineitä, niihin liittyviä informaatioteknologioita ja vaihtoehtoisia reunalaskenta-alustoja, jotka mahdollistavat reaaliaikaisen, älykkään ja itsenäisen pääsyn, tietojen keräämisen, analysoinnin ja vaihdon prosessin, tuotetta tai palvelutietoihin teollisessa ympäristössä, jotta tuotannon arvo voidaan optimoida. Arvo voi parantaa tuotteiden tai palveluiden toimittamista, tehostaa tuottavuutta, vähentää työvoima- tai energiakustannuksia tai lyhentää tuotteistamisen sykliä".

2.2 5G-verkot

5G:llä tarkoitetaan 5:n sukupolven langatonta matkapuhelinverkkoa, jota otetaan hiljalleen käyttöön maailmalla. ITU:n eli kansallisen televiestintäliiton mukaan maailmalla oli 7.5 miljardia mobiililaitetta vuonna 2017 ja niiden määrä kasvaa räjähdysmäisesti. 5G-verkon odotetaan siis vastaavan kasvavaan datan määrään, tukemaan tiukkojen QoS-sovelluksia, jotka vaativat erittäin pientä viivettä ja hyvää suorituskykyä sekä mahdollistamaan heterogeenisen laitejoukon yhteensopivuus vaihtelevilla verkkotyypeillä (Hassan, Yau ja Wu 2019). Verkkoon liitettävien laitteiden määrää tulevaisuudessa on vaikea arvioida, mutta voidaan puhua jopa 50 miljardista laitteesta vuoteen 2030 mennessä osana esineiden internetin(engl. IoT) kehitystä. Sen odotetaan hyödyttävän monia teollisuuden aloja ja jouduttavan esineiden internetiä ja MEC:a. Jokaisella käyttäjällä odotetaan olevan minimissään 100 Mbps:n tiedonsiirtonopeus ja huippunopeus jopa 20 Gbps downlink ja 10 Gbps uplink-suunnassa(Ahmad ym. 2020, Parkvall ym. 2017). Viiveiden odotetaan kriittisissä pienen viiveen vaativissa sovelluksissa olevan 1 ms:n luokkaa(Hassan, Yau ja Wu 2019).

5G NR (engl.New Radio) puolestaan on 3GPP:n luoma radiorajapinta viidennen sukupolven langattomille verkoille. R15 oli ensimmäinen ei-itsenäinen julkaisu 5G NR verkoille, joka tarkoittaa sitä että se tukeutuu vielä LTE:n ratkaisuihin esimerkiksi liikkuvuuden kannalta, kun taas R16 on ensimmäinen itsenäinen NR julkaisu. 3GPP on määritellyt, että 5G NR tukee taajuusalueita laajasti alle 1 GHz:stä aina 52.6 GHz:iin asti lisensoiduilla ja lisensoimattomilla taajuusalueilla. Tämä mahdollistaa erittäin suuren käyttäjämäärän. Korkeam-

missa taajuuksissa on kuitenkin suurempi radiokanavan vaimennus, joka pienentää verkon peittoaluetta joten matalampien taajuuksien käytössä on siten etunsa (Parkvall ym. 2017).

5G NR arkkitehtuuriin kaksi pääkomponenttia ovat RAN ja ydinverkko CN(engl. The Core Network) (Parkvall ym. 2017). RAN:a käydään läpi tarkemmin kappaleessa 2.4, mutta se koostuu erityyppisistä laitteista kuten pienistä soluista ja kodin järjestelmistä jotka yhdistävät matkapuhelinten käyttäjät ja langattomat laitteet ydinverkkoon. Rakennusten ja kodin sisäisten pienten solujen tehtävä on täydentää 5G-verkkojen makroverkkoa paremman peittoalueen takaamiseksi siellä missä verkkoja tarvitaan. Käyttöön on otettu korkeat taajudet (30 GHz - 52.6 GHz) laajentamaan kaistanleveyden suureksi. Pienten solujen käyttö pienentää siten lähetyksen matkaa ja vähentää signaalin häiriöitä(Parkvall ym. 2017).

5G-maksosolujen gNB (engl. Next Generation NodeB) tukiasemat käyttävät MIMO (engl. Multiple Input Multiple Output) antennoja. Tuettavien antennien määrää on NR:ssä lisätty yli 64 - 256:ään kappaleeseen, jota kutsutaan Massive MIMO nimityksellä (Parkvall ym. 2017). Antennien määrää lisäämällä voidaan toteuttaa suuntaava lähetys (engl. beamforming) ja vähentää siten häiriöitä ja mahdollistaa naapurisolmujen yhtäaikainen kommunikointi. Pienten solujen kantama on ainoastaan noin 10 metristä muutama sataan metriin. RAN yhdistetään itse ydinverkkoon, joka taas hoitaa kaiken matkapuhelimen viestinnän ja datasiirron internetin välityksellä (Hassan, Yau ja Wu 2019, Parkvall ym. 2017).

Samoin kuten LTE, NR perustuu OFDM (engl. Orthogonal Frequency Division Multiplexing) modulaatioon, joka perustuu diskreettiin Fourier muunnokseen (engl. DFT/Discrete Fourier Transform). NR:n alikantoaallot vaihtelevat 15 kHz:n ja 240 kHz:n välillä. 240 kHz:n alikantoaalloja käytetään synkronointiviestien lähettämiseen korkeammilla kantoaalloilla taajuuksilla. Yksi kantoaallo voi koostua korkeintaan 3300 alikantoaallostaa, joten jos alikantoaaltojen koot ovat 15/30/60/120 kHz:ä niin maksimi kaistanleveydet ovat sen mukaisesti 50/100/200/400 MHz:ä. NR:n 10 ms:n kehys on jaettu kymmeneen 1 ms:n alikehykseen. Alikehykset koostuvat lohkoista, jotka puolestaan koostuvat 14:sta OFDM-symbolista. 15 kHz:n alikantoaallolla yhteen alikehykseen mahtuu siten yksi 1 ms:n kestävä lohko ja 30 kHz:llä puolestaan mahtuu kaksi 0,5 ms:a kestävä lohko. 15 kHz:n alikantoaallolla on sama rakenne sekä LTE:ssä, että NR:ssä, mikä mahdollistaa 4G- ja 5G-verkkojen rinnakkaisen (Parkvall ym. 2017, Patriciello ym. 2018).

2.3 Reunalaskenta

Reunalaskenta(engl. Edge computing) on tärkeä edistysaskel, jonka 5G-arkkitehtuuri mahdollistaa. Sen tarkoituksena on tuoda pilvipalvelujen palvelut ja ohjelmat lähemmäs loppukäyttäjää sekä mahdollistaa datan nopea prosessointi sovelluksen lyhyellä vasteajalla. Loppukäyttäjää käyttää sovelluksia tavallisesti resursseilla rajoitetuilla mobiililaitteillaan, kun taas itse ydinpalvelu ja datan käsittely suoritetaan pilvipalvelimilla. Pilven ollessa kaukana käyttäjistä se johtaa isompiin viiveisiin ja liikkuvuuteen liittyviin ongelmiin. Reunalaskenta tuo prosessoinnin nimensä mukaisesti pilven reunalle jolloin pystytään paremmin vastaamaan näihin ongelmiin(Khan ym. 2019). Reunalaskennan onnistuneeksi katsotulle toiminnalle 5G-verkoissa on Hassan, Yaun ja Wun mukaan seuraavia vaatimuksia (Hassan, Yau ja Wu 2019):

- Reaaliaikainen vuorovaikutus, joka takaa pienet viiveet tukemaan viiveille herkille sovellusalueille QoS:n parantamiseksi.
- Prosessien suorittaminen paikallisesti reunal palvelimilla on oltava mahdollista, jotta pystytään vähentämään dataliikennettä päätelaitteen ja ydinverkon välillä.
- Suuren datamäärän siirtämiseksi pilven reunalle on oltava suuri tiedonsiirtonopeus.
- Pilvipalveluiden hyvä saavutettavuus reunaverkkoihin on tietenkin olennaista, koska palveluiden toteutus tapahtuu reunaverkoissa.

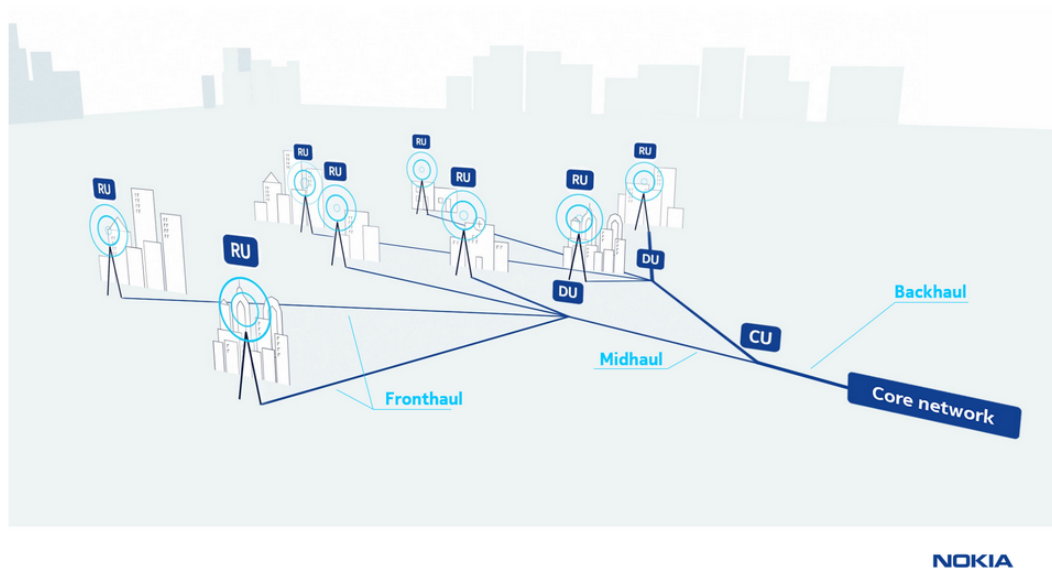
Reunalaskennan ero verrattuna pilvilaskentaan (engl. Cloud computing) on se, että reunalaskenta on itseasiassa kehittyneempi versio pilvilaskennasta. Tärkein ero on palvelimen sijainnissa, jossa reunalaskennassa palvelin sijaitsee verkon reunalla ja pilvilaskennassa taas internetissä. Pilvipalvelut keräävät, käsittelevät ja tallentavat valtavan määrän dataa loppukäyttäjistä ja lähettävät myöhemmin tiedon tai päätöksen takaisin loppukäyttäjälle. Pilvilaskennassa hyppyjen merkittävä määrä aiheuttaa kuitenkin viivettä pilvipalveluiden saavutettavuuteen loppukäyttäjälle eikä se siten sovellu reaaliaikaisia palveluita vaativille sovelluksille kuten etäkirurgian toteuttamiseksi terveydenhuollossa (Khan ym. 2019; Hassan, Yau ja Wu 2019).

2.4 O-RAN

RAN (engl. Radio Access Network) tai D-RAN (engl. Distributed Radio Access Network) arkkitehtuurista puhuttaessa tarkoitetaan perinteistä verkkoarkkitehtuuria, joka on ollut käytössä 1G-verkoista asti. RAN toimii minkä tahansa langattoman laitteen kuten matkapuhelimen ja ydinverkon välillä ja yhdistää ne toisiinsa. RAN:n tukiaseman (engl. BS/Base Station) radiolähetinyksikkö RU (engl. radio unit)/RRH (engl. remote radio head) vastaa digitaalisen radiosignaalin käsittelystä lähettämällä, vastaanottamalla ja muuttamalla signaaleja tarpeen mukaan. RRH kommunikoi tukiaseman DU (engl. Digital Unit)/BBU (engl. base band unit) kanssa CPRI(engl. Common Public Radio Interface) rajapinnan kautta. BBU yksikkö toimii linkkinä, joka käsittelee vastaanotetut signaalit RHH:n ja ydinverkon välillä, jotta ne voidaan välittää RHH:sta ydinverkkoon tai ydinverkosta lähetettää RHH:n kautta eteenpäin käyttäjälle. BBU:n ja ydinverkon välistä linkkiä kutsutaan tässä perinteisessä arkkitehtuurissa backhaul-nimellä (Gonçalves ym. 2020).

C-RAN solukkojärjestelmäarkkitehtuuri:ssa signaalin käsittely toiminnot eli BBU:n tehtävät on siirretty kokonaan tai osittain pilvipalvelussa suoritettaviksi. Arkkitehtuurissa BBU yksikkö sijaitsee siis tässä arkkitehtuurissa pilvessä ja RRH sijaitsee edelleen tukiasemassa etäantennielementtinä. RRH:n ja BBU:n välistä linkkiä kutsutaan tässä arkkitehtuurissa fronthaul-nimellä ja BBU:n ja ydinverkon välistä yhteyttä backhaul-nimellä (Gavrilovska, Rakovic ja Denkovski 2020; Gonçalves ym. 2020). Fronthaul-linkki toteutetaan, joko valokuitukaapelilla tai langattomasti. Tämän arkkitehtuurin suurimpina etuina on käyttöönoton helpottuminen, koska tarvitaan vain uuden RRH:n asennettava tukiasemaan ja yhdistettävä BBU:n pilveen, jonka seurauksena käyttöönotto helpottuu ja käyttökustannukset laskevat (Gonçalves ym. 2020).

O-RAN tai Open RAN on seuraava askel RAN-arkkitehtuurissa, jonka kaksi päätavoitetta on tehdä RAN-arkkitehtuurista avoimempi ja älykkäämpi matkalla kohti 5G- ja 6G-verkkoja. Avoimuutta haetaan luomalla avoimet standardit, jotta operaattorit voisivat valita RAN-komponentit eri toimittajilta erikseen ja poistaa siten turhat rajoittimet, jotka pakottavat valitsemaan tietyn laitteiston tai sovelluksen(Niknam ym. 2020). O-RAN arkkitehtuurissa on jaeltu osia pienemmiksi palasiksi ja tehty muutoksia siten, että backhaul-linkiksi nimetään tässä keskusyksikön eli CU(engl. Center Unit) ja ydinverkon välinen osa arkkitehtuuria ja midhaul-



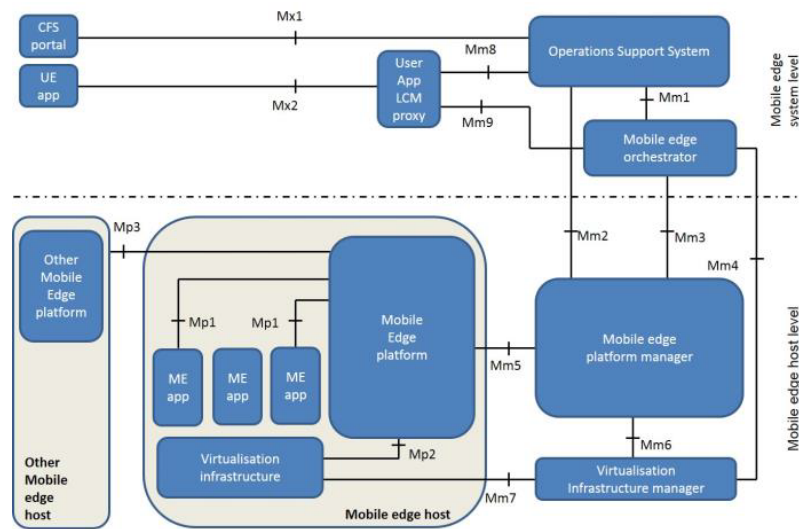
Kuvio 1. O-RAN yksinkertaistettu arkkitehtuuri (“Opening the RAN” 2022)

linkiksi kutsutaan CU:n ja jakeluyksikön eli DU:n (engl. Distributed Unit) välistä osuutta, mutta fronthaul-nimitys on edelleen pysynyt RU:n ja DU:n välisenä. Jokaisella CU:lla voi olla useampi DU, mutta jokaisella DU:lla voi olla ainoastaan yksi CU. CU on noodi, jonka tehtäviin kuuluu esimerkiksi liikkuvuuden ohjaus, paikannus, istunnonhallinta jne. Vastavalla tavalla yhdellä DU:lla voi olla useampia RU soluja ohjattavanaan (Mohsin ym. 2021).

2.5 MEC

MEC:a (engl. Multi-access Edge Computing tai Mobile Edge Computing) pidetään avaintekniikkana siirtymisessä tulevaisuuden IoT- ja 5G-maailmaa. Se on Euroopan telealan standardoimisjärjestön eli ETSI:n(engl. European Telecommunications Standards Institute) luoma verkkoarkkitehtuuriratkaisu, jonka tarkoituksena on avonaistaa RAN ja mahdollistaa siten pilvilaskennan ja uusien sovellusten toteuttamisen valtuutetuille kolmansille osapuolille so-lukkojärjestelmien verkon reunalla. MEC-arkkitehtuuri on kuvattu kuvassa 2.

Arkkitehtuurista muutamina tärkeimpinä rakenteina mainittakoon mobiilireunan isäntä(engl. Mobile Edge host/ME host), mobiilireunan alusta(engl. Mobile Edge platform/ME platform) ja mobiilireunan sovelluksille (engl. Mobile Edge application/ME application). ME host



Kuvio 2. MEC-arkkitehtuuri (Dario Sabella ym. 2016)

kokonaisuus rakentuu ME platform, ME application ja NFVI virtuaali infrastruktuuriosasta. Sen tehtävänä on tarjota laskenta-, tallennus-, ajanhallinta- ja verkkoresursseja mobiili-reunan sovelluksille sekä ohjata dataliikennettä sovellusten ja verkon välillä (Dario Sabella ym. 2016; D. Sabella ym. 2018).

ME platform:n tehtävä on tarjota keskeiset perustoiminnot sovellusten suorittamiseen ME host:n sisällä, kuten ohjaamaan dataliikennettä sovellusten, palveluiden ja verkkojen välillä. ME platform voi kommunikoida lisäksi muiden alustojen kanssa Mp3 rajapinnan kautta. ME application ovat sovelluksia, jotka toimivat virtuaalikoneina ME host:n virtuaali-infrastruktuurin päällä. Sovellukset käyttävät ME platform tarjoamia perustoimintoja Mp1 rajapinnan kautta tai sovellukset tarjoavat palveluja ME platform:lle, joka voi mainostaa niitä muille sovelluksille edelleen (Dario Sabella ym. 2016; D. Sabella ym. 2018).

MEC:n lisäksi on olemassa useita muita arkkitehtuurisia ratkaisuja reunalaskennan toteuttamiseksi, joista esimerkkinä Cloudlet, CORD ja Fog computing. Sopiva arkkitehtuuriratkaisu riippuu käyttökohteesta ja -tarkoituksesta, mutta MEC-ratkaisu keskittyy ensisijaisesti matkapuhelinverkkoon internetin sijaan ja sen tarkoituksena on tarjota avoin RAN-arkkitehtuuri (engl. open RAN) verkon reunalle, jonka sovellustuskohdeet voivat olla esimerkiksi videoleikeiden toisto/virtuaalimaailman optimointi (Pan ja McElhannon 2017).

3 Esineiden internetin tiedonsiirtotekniikat

Esineiden internetin langattomia tiedonsiirtotekniikoita on olemassa useita. Näillä jokaisella on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, mutta jokaiselle tekniikalle löytyy parhaiten tiettyyn tehtävään sopiva kohteensa. 5G-yhteydet käsiteltiin jo kappaleessa 2.2 tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi, joitakin tunnetuimpia näistä muista tiedonsiirtotekniikoista. Lisensoimattomilla kaistoilla toimivat tekniikat LoRaWAN ja Sigfox käydään läpi kappaleissa 3.1 ja 3.2. Licensoiduilla kaistoilla toimivat tunnetuimmat tekniikat taas ovat NB-IoT ja LTE-M, jotka käydään läpi luvuissa 3.3 ja 3.4. Luvussa 3.5 tutustutaan myös kaikkia edellämainittuja huomattavasti lyhyemmän kantaman BLE tekniikkaan.

3.1 LoRaWAN

LoRa on Semtech:n suunnittelema fyysisten laitteiden teknologia. LoRaWAN taas tarkoittaa LoRa-Alliance:n luomaa tiedonsiirtoprotokollaa, joka moduloi signaaleja ali-GHZ-ISM kaistalla käyttämällä hajaspektritekniikkaa ja toimii lisensoimattomilla ISM-kaistoilla ja esimerkiksi meillä Euroopan alueella 868 MHz:n taajuudella. LoRa-laitteet käyttävät kaksisuuntaisessa viestinnässä niin kutsuttuja "viserryksiä"(engl.chirp eli CSS (the chirp spread spectrum)) viestejä, joka levittää kapean kaistanleveyden signaalit laajemmalle kaistanleveydelle(Mekki ym. 2018,Kabalçı ja Ali 2019).

LoRa:ssa käytetään kuutta eri levityskerrointa (SF7-SF12) datanopeuden ja kantaman mukauttamiseen. Korkeampi hajoituserroin mahdollistaa pidemmän kantaman, mutta pienentää datanopeutta. Levityskertoimella SF12 voidaan saavuttaa n. 20 km:n kantama maaseutualueilla. LoRaWAN käyttää kaistanleveyksillä 125 kHz:n, 250 kHz:n tai 500 kHz:n kaistanleveyksiä ja sen tiedonsiirtonopeus on pienimmillään n. 300 bps (SF12) ja suurimmillaan 50 kbps:a (SF7)(Mekki ym. 2018,Kabalçı ja Ali 2019) ja viestien maksimihyötykuorma on 243 tavua. Kaikki tukiasemat laitteen kantaman sisällä ottavat vastaan jokaisen päätelaitteen lähettämät viestit, mikä parantaa vastaanotettujen viestien suhdetta. Kopiot samasta vastaanotetusta viesteistä suodatetaan verkkopalvelimella ja eri tukiasemien saamia kopioita voidaan käyttää myös päätelaitteiden paikantamiseen(Mekki ym. 2018,Kabalçı ja Ali 2019,Adelanta-

do ym. 2017). LoRaWAN määrittelee myös kolme kommunikointiluokkaa, jotka vaikuttavat viestien viiveeseen:

- *Luokka A - Kaksisuuntaiset päätelaitteet* - päätelaitteet sallivat kaksisuuntaisen viestinnän, jossa jokaista päälaitteelta nousevaa viestiä kohti seuraa kaksi lyhyttä laskevaa vastaanottoikkunaa. Tämä on energiatehokkain viestintäkeino, mutta tukiasemien on odotettava päätelaitteen nousevaa viestiä ennen kuin viestin lähettäminen päätelaitteelle on mahdollista (Mekki ym. 2018, Adelantado ym. 2017).
- *Luokka B - Kaksisuuntaiset päätelaitteet ajoitetuilla vastaanottoikkunoilla* - toimivat kuten luokan A laitteet, mutta satunnaisten vastaanottoikkunoiden lisäksi laitteet avaavat vastaanottoikkunoita tukiaseman kanssa sovittuina ajankohtina. Sopivat paremmin tilanteisiin, joissa IoT-laitteille tarvitaan lisää lähetysaikaa downlinkin suuntaan (Mekki ym. 2018, Adelantado ym. 2017).
- *Luokka C - Kaksisuuntaiset päätelaitteet maksimaalisella vastaanottoikkunoilla* - päätelaitteilla melkein jatkuvasti avoimet vastaanottoikkunat, jotka sulkeutuvat vain lähettäessä. Luokan C laitteilla on luonnollisesti suurin virrankulutus, mutta viive pienimmillään (Mekki ym. 2018, Adelantado ym. 2017).

LoRaWAN:n suurin etu on mukautuvuus monenlaiseen käyttökohteeseen. Levityskerrointa muuttamalla saadaan, joko kantamaa tai tiedonsiirtonopeutta toisen kustannuksella. Heikoutena taas voidaan katsoa suhteellisen pieni hyötykuorma ja tiedonsiirtonopeus. LoRaWAN sopiikin monenlaisiin sovelluskohteisiin sen mukautuvuuden ansiosta.

3.2 Sigfox

Sigfox yhtiön luoma UNB-teknologia (engl. Ultra Narrow Band) käyttää omia tukiasemiaan, jotka yhdistyvät sitten perinteiseen IP-pohjaiseen runkoverkkoon. Tukiasemiin yhdistyvät päätelaitteet käyttävät binääristä vaiheensiirtoavainta (BPSK) erittäin kapealla 100 Hz:n ali-GHz-ISM kanta-aallolla. Sigfoxin käyttämät ISM-kaistat ovat lisensoimattomia ja sama kuin mitä käytetään LoRaWAN:n (868 MHz) kanssa Euroopassa. Erittäin kapean kaistan ansiosta lähetyksissä on vähän häiriöitä, mikä johtaa alhaiseen virrankulutukseen ja hyvään signaalin hyötysuhteeseen. Sigfox:n suurimpana heikkoutena on ainoastaan 100 bps:n maksimi tie-

donsiirtonopeus 100 Hz:n kaistanleveydellä. Tästä myös nimitys Ultra Narrow Band(Mekki ym. 2018,Kabalçı ja Ali 2019).

Sigfox:ssa on mahdollisuus kaksisuuntaiseen viestintään, mutta datansiirto downlinkin suuntaan voi tapahtua ainoastaan tietyn aikahaarukan sisässä päätelaitteelta tukiasemalle lähetyn viestinnän jälkeen. Uplinkin suuntaan viestien määrä on rajoitettu 140 kappaleeseen päivässä ja jokaisen viestin maksimi hyötykuorma on 12 tavua. Downlink viestien määrä on rajoitettu vain neljään viestiin päivässä, joiden hyötykuorma on maksimissaan 8 tavua. Uplink-viestejä ei kuitata mitenkään vastaanotetuiksi joten luotettavuutta lisätään käyttämällä kopioita samasta viestistä. Sama viesti lähetetään kolme kertaa eri kanavilla. Päätelaite voi satunnaisesti valita kanavan, jonka kautta viesti lähetetään, koska tukiasemat pystyvät vastaanottamaan viestejä kaikilta kanavilta yhtäaikaan. Viestien kantavuus on lähteiden mukaan n. 10 km:a kaupunki ja 40 km:a maaseutuuympäristössä(Mekki ym. 2018,Kabalçı ja Ali 2019).

Sigfox on ehkä vähiten tunnetuin tekniikka Suomessa. Sen vahvuudet ovat pieni virrankulutus ja hyvä kantavuus, mutta heikkoutena taas heikko tiedonsiirtonopeus. Se sopii parhaiten sovelluksiin, joissa riittää välittää todella pieniä viestejä ja pääasiassa pelkästään uplink:n suuntaan.

3.3 NB-IoT

NB-IoT(engl. Narrow Band-IoT) on 3GPP:n vuonna 2016 julkaisussa 13 standardoima kapeakaistainen internet-tekniikka, joka toimii lisensoituilla GSM- ja LTE-taajuusalueilla ja käyttää 200 KHz:n kaistanleveyttä, joka vastaa yhtä lohkoa GSM- ja LTE-lähetyksissä (Mekki ym. 2018,Kabalçı ja Ali 2019). NB-IoT palveluita tarjoavat operaattorit määrittelevät viestin kuljetuksen toimimaan joko:

- itsenäisesti hyödyntämällä 200 kHz:n GSM lohkoja.
- hyödyntämällä LTE-lohkojen välisiä 180 kHz:n suojakaistoja LTE-kantoaaltojen välissä.
- hyödyntämällä 180 kHz:n lohkoja LTE-kantoaallon sisällä (Mekki ym. 2018,Kabalçı ja Ali 2019).

NB-IoT:lla on mahdollista liittää jopa 100 000 päätelaitetta yhtä solua kohden ja skaalautuvuutta voidaan lisätä entisestään lisäämällä NB-IoT-kantoaaltoja. Lähetysnopeus voi olla maksimissaan 200 kbps:a, joista jokaisen viestin maksimi hyötykuorma on 1600 tavua. Kantama taas on noin 10 km:n luokkaa maaseutu ympäristössä.

NB-IoT:n vahvuuksiin kuuluu lisensoitujen taajuuskaistojen käyttö, mikä takaa lähetyksen luotettavuuden sekä LoRaWAN ja Sigfox:n verrattuna huomattavasti isompi teoreettinen tiedonsiirtonopeus sekä skaalautuvuus päätelaitteiden määrän suhteen. Heikkoutena taas voidaan mainita hinta, sillä sekä laitteet että tiedonsiirtomaksavat enemmän. Siinä missä LoRaWAN ja Sigfox:n tiedonsiirto on ilmaista lisensoimattomilla kaistoilla, määrittelevät operaattorit tiedonsiirron hinnan NB-IoT:ssa (Mekki ym. 2018, Kabalcı ja Ali 2019).

3.4 LTE-M

LTE-M tai LTE-M(TC) suunnittelu käynnistyi alkujaan 3GPP:n toimesta MTC (engl. Machine Type Communication) eli konetyyppisen viestinnän saavuttamiseksi. LTE-M ja LTE käyttävät samaa verkkoa viestimiseen ja LTE-tukiasemat voidaan tarpeen mukaan päivittää tukemaan LTE-M yhteyksiä. Vuonna 2008 3GPP:n julkaisussa 8 standardoitiin alkujaan vaatimukset LTE:n Cat.1 ja Cat.4 laitteille, joissa on varsin korkeat vaatimukset uplink- ja downlink-vaatimusten suhteen LTE-laitteille. Ne eivät siten soveltuneet kunnolla M2M (engl. machine to machine) tyyppiseen viestintään eikä niitä siksi ei oikeastaan lueta MTC-kategoriaan (Dawaliby, Bradai ja Pousset 2016).

Vuonna 2016 julkaisussa 13 versiossa julkaistiin LTE-M tekniikka ja vaatimukset Cat.1.4 MHz ja Cat.200 kHz LTE-M laitteille, joilla LTE-M pystyy saavuttamaan Cat. 1.4 MHz laitteilla teoreettisesti 1 Mbps:n tiedonsiirtonopeudet sekä downlink- että uplink-suuntaan. Laitteen kategoriasta riippuen kaistanleveys on nimensä mukaisesti joko 180 kHz:a tai 1.4 MHz:a ja maksimi tiedonsiirtonopeudet 144 kbps:a ja 1 Mbps:a uplinkin suuntaan. Kantama LTE-M tekniikalla on noin 11 km:a lähteiden mukaan (Dawaliby, Bradai ja Pousset 2016, Ismail ym. 2018).

LTE-M suurin etu edellä lueteltuihin Sigfox, LoRaWAN ja NB-IoT verrattuna on hurjan paljon pienemmät viiveet Ismail. ym. mukaan (Ismail ym. 2018). Siinä missä edellä mainitut tek-

niikat voivat viedä sekunteja(jopa 10 s), LTE-M hoitaa viestin välityksen millisekunnissa(10-15ms) ja sopii siten paremmin teollisuuden matalan viiveen sovelluksiin, joissa tarvitaan ehdottomasti pienempiä viiveitä. Heikkoutena on NB-IoT:n tapaan, että lisensoituja taajuuksia joten laadusta joudutaan maksamaan.

3.5 BLE

Kappaleessa edellä käsitellyjä tekniikoita huomattavasti lyhyt kantoisempi SIG:n (engl. Special Interest Group) suunnittelema tekniikka BLE (engl. Bluetooth Low Energy) tai tarkemmin puhutaan bluetooth-teknologian versiosta Bluetooth 4.0. BLE toimii 2.4 GHz:n taajuudella, jossa on 40 kanavaa 2 MHz:n välein ja näistä osa on data- ja kolme kanavaa on ns. "mainostuskanavia". Mainoskanavat ovat tarkoitettu laitteiden etsimiseen ja yhteyden muodostukseen, kun taas datakanavat ovat tarkoitettu kaksisuuntaista tiedonsiirtoa varten. Yhteyden muodostus toimii isäntä-orja mallilla(Gomez, Oller ja Paradells 2012).

Tiedonsiirrossa huippunopeus tällä versiolla on n. 1 Mbps:a ja paketin koko vaihtelee välillä 8 - 47 tavua, mutta kantama on vain muutamia kymmeniä metrejä. Lähteiden mukaan tekniikalla voitaisiin saavuttaa pienempi kuin 3 ms:n päästä päähän viive (Gomez, Oller ja Paradells 2012).

BLE sopiikin parhaiten sovelluskohteisiin, joissa ei tarvita pitkää kantamaa sillä se on tämän tekniikan heikoin osa-alue muihin langattomiin verkkotekniikoihin verrattuna. LoRaWAN ym. verrattuna taas tiedonsiirtonopeus varsin hyvä, mikä tekeekin siitä harkittavan tekniikan silloin, kun kantamat eivät ole pitkiä. LoRaWAN ym. verrattuna myös viiveet ovat BLE:ssä huomattavan paljon pienempiä, mikä tukee reaaliaikaisuutta silloin, kun sitä tarvitaan eikä tiedonsiirrosta tarvitse maksaa.

4 Azure

Mahdollisia pilvipalvelualustoja omien tuotteiden kehitykseen löytyy maailma useita. Näistä tunnetuimmat lienevät AWS, GoogleCloud ja Azure, mutta nekin vain yksittäisiä valtavasta massasta. Tässä luvussa käydään läpi Microsoftin Azure pilvipalvelua ja sen tarjoamia reunalaskentamahdollisuuksia. Azure:lla pystytään rakentamaan toimiva kokonaisuus alusta loppuun pelkästään Azuren laitteistoa ja pilvisovelluksia käyttäen, joten tuotekehitystä pystytään nopeuttamaan huomattavasti.

Ensimmäisessä kappaleessa käsitellään esimerkillinen MEC-arkkitehtuuriratkaisu Azure-tuotteiden kokoonpanolla rakennettuna. Kappaleessa 4.2 tutustutaan Microsoftin tarjoamaan laitteistoon, jolla voidaan vaivattomasti luoda reunalaskentasovelluksia verkon reunalle. Seuraavassa kappaleessa 4.3 tutustutaan Azure Stack Edgen hallinnointityökaluun, jolla otetaan käyttöön tarvittavat toiminnot laitteistolle. Lukuun 4.4 on koottu ja selitetty lyhyesti mahdollisia reunalaskentasovelluksissa käytettäviä Azure:n palveluita, joita on olemassa yli 200 kappaletta. Tässä luvussa on esitelty vain sellaiset Azure:n palveluista, jotka voisivat esiintyä kuvitteellisessa teollisuuden esineiden internetin tuotteessa.

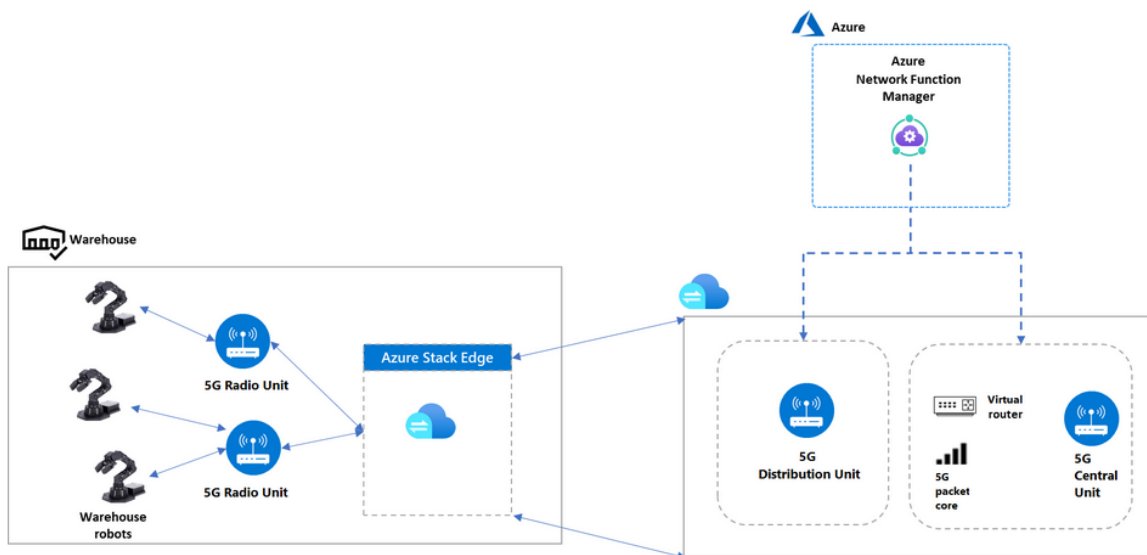
4.1 Azure reunalaskenta arkkitehtuurissa

Kappaleessa 2.1 käsiteltiin teollisuuden esineiden internetin määritelmää ja käyttökohteita. Tässä kappaleessa esitellään yksi mahdollinen MEC-arkkitehtuuriratkaisu kuinka voidaan hyödyntää itsenäisiä 5G-verkkoja matala viiveisten ja korkeaa suorituskykyä vaativien teollisen automaatioiden käyttökohteissa käyttämällä Azuren pilvipalvelu ratkaisuja.

Kuvassa 3 on esitelty Azure:n arkkitehtuurimalli tästä esimerkistä, jossa yksityiseen 5G-verkkoon on liitetty esineiden internetin asioita (esim. varastoautomaatteja, robotteja jne.), jotka kommunikoivat toistensa kanssa itsenäisesti esimerkiksi tehdasympäristössä tai varastossa. Itsenäisellä verkolla eli NPN (engl. Non-Public Network) tarkoitetaan verkkoa, jonka kaikki tiedot jäävät suljetun verkon sisälle eivätkä julkiseen jakeluun. NPN-kokoonpanolla voidaan parantaa järjestelmän tietoverkkoturvallisuutta, yksityisyyttä ja luotettavuutta vaativassa toimintaympäristössä, joten se on toimiva ratkaisu teollisuuden tarpeisiin (“Low-

latency network connections for industry” 2021).

Kuvan 3 mallin mukaisesti muodostetaan 2.4 kappaleessa esitetyllä tavalla langattomasti yhteys esim. varastoautomaattirobotilta 5G yhteensopivaan O-RAN arkkitehtuurin mukaiseen radioyksikköön. Radioyksiköiden fronthaul-linkki muodostetaan langallisesti jakeluyksikköön(DU), joka toimii ohjelmistona Azure Stack Edge laitteistossa. 5G-jakeluyksikkö yhdistetään virtuaalireitittimeen, 5G-keskusyksikköön (CU) ja 5G-pakettiyttimeen, jotka toimivat erillisessä MEC instanssissa Azure Stack Edge laitteella. Azure Network Function Manager ohjaa molempia näitä kahta MEC instanssia. 5G-pakettiytimen tehtävä on tarjota tässä laitteelle autentikointi, IP-osoitteen määrittäminen ja yhteydet. Tällä tavalla pystytään optimoimalla ja liikennettä rajoittamalla saavuttamaan yksityisen 5G-verkon sisällä matala viiveiset yhteydet (“Low-latency network connections for industry” 2021).

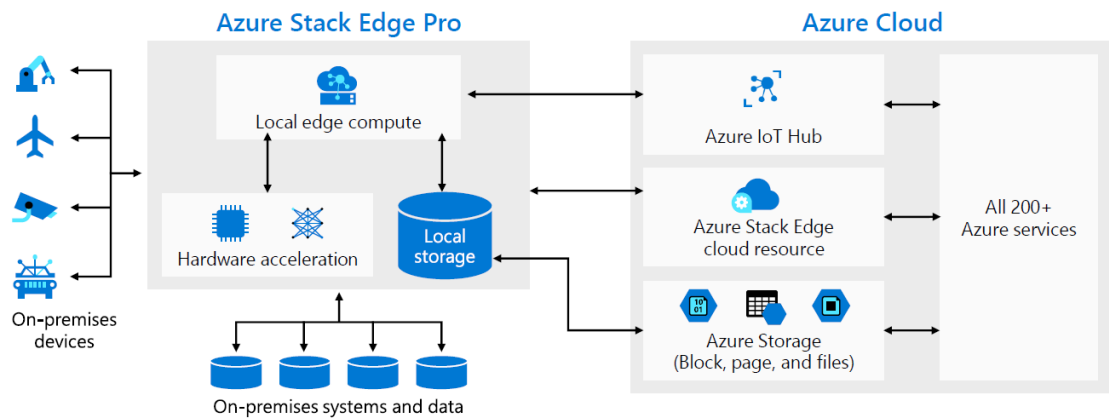


Kuvio 3. Azure:n esimerkinomainen käyttö IIoT arkkitehtuurissa (“Low-latency network connections for industry” 2021)

Kuvan 3 arkkitehtuurimalli sopii esimerkiksi varastonhallintatyökaluksi lähetyksen keräilyssä, maataloudessa autonomiseen siementen ruiskutukseen maaperän tilatietojen mukaan tai valojenhallintatyökaluksi työtiloissa liikkeen tunnistuksen perusteella. Nämä ovat toki vain yksinkertaisia esimerkkejä ja lisää IIoT:n sovellustympäristöjä voidaan löytää esimerkiksi terveydenhuollosta, itseohjautuvista autoista jne.

4.2 Azure Stack Edge

Azure Stack Edge on pilvitalennusyhdykäytävä, joka mahdollistaa nopean tiedonsiirron Azure:n pilvipalveluihin, mutta säilyttää samalla paikallisen tietojen säilytyksen mahdollisuuden. Laitteistolla kyetään tuomaan Azuren laskenta, tallennustila ja älykkyys verkon reunalle. Säilytyssovellukset ja virtuaalikoneet pystytään luvussa 2.3 esitetyn reunalaskentamallin mukaisesti suorittamaan aivan verkon reunalla, jossa tiedot luodaan ja kerätään. Laitteistoa voidaan käyttää eri koneoppimissovelluksissa tekemään päätelmiä verkon reunalla ja analysimaan, muuttamaan ja suodattamaan nämä kerätyt tiedot ennen niiden lähettämistä pilveen jatkokäsittelyä tai tallennusta varten (“Azure Stack Edge Pro” 2020).



Kuvio 4. Azure Stack Edge (“Azure Stack Edge Pro” 2020)

Laitetta ja sen asetuksia voidaan hallinnoida pilven kautta Azuren hallintatyökaluilla. Paikallisella välimuistitoiminnon ja kaistanleveyden rajoittimen avulla voidaan optimoida tiedonsiirrot Azureen ja takaisin siten että ne siirretään joskun muulloin kuin ruuhka-aikana (“Azure Stack Edge Pro” 2020). Azure Stack Edgen mahdollisia sovelluskohteita voivat olla esimerkiksi koneoppimissoveluukset tai esineiden internetin sovellukset. Kuvassa 4 on havainnollistettu Azure Stack Edge Pro mallin arkkitehtuuria.

4.3 Azure Network Function Manager

Azure Network Function Manager on hallinnointityökalu luvussa 4.2 esitetylle Azure Stack Edgelle. Tähän hallinnointityökaluun kuuluu Azure Marketplace, joka on on kuin verkko-kauppa, jolla voidaan valita ja ottaa käyttöön eri verkkotoimintoja valmiista tuotelistasta. Näihin kuuluu esimerkiksi VPN-palvelut ja SD-WAN verkkotoiminnot sekä kasvava joukko muita palveluita yhteistyökumppaneilta (“What is Azure Network Function Manager?” 2021). Azure Network Function Manager:n hyöty on se, että sillä voidaan jouduttaa Azure Stack Edge laitteiston käyttöönottoa ja luoda laitteistolle yksityinen LTE/5G-verkko valmiilla tuotepaketeilla.

Azure Marketplace:n yhteistyökumppanit voivat luoda omia mukautettuja verkkotoimintoja verkkokaupalle, jonka kautta ne voivat myös laskuttaa luomiensa ohjelmistojen käyttölisenssimaksuja. Azure Stack Edge-laitteen verkkotoiminnot käyttöönotettaessa on mahdollisuus valita kahdesta eri resurssiryhmän sovelluksista omille tarpeilensa sopivan ratkaisun.

Asiakasresurssiryhmä:n (engl. Customer resource group) sovellukset ovat hallittavia sovelluksia, joiden asetuksia päästään muuttamaan asiakkaan tarpeen mukaisesti, kun taas halittujen resurssiryhmän (engl. Managed resource group) sovellusten asetuksia ei pystytä määrittämään tai muuttamaan suoraan, koska niitä hallitsee sovelluksen julkaisija (“What is Azure Network Function Manager?” 2021).

4.4 Azure komponentteja reunalaskenta arkkitehtuurissa

Edellisessä kappaleessa käytiin läpi Azuren pilvipalvelualustaa ja sen tuottamia etuja tuotekehityksessä. Tässä kappaleessa käydään läpi lyhyesti mahdollisia Azure:n pilvipalveluiden komponentteja, joita voitaisiin käyttää kuvitteellisesta teollisuuden esineiden internetin kohdesovelluksessa:

- *IoT Edge* - Azure IoT Edge:n avulla pilvianalytiikka ja mukautettu liiketoimintamalli voidaan siirtää reunalaitteisiin tiedonhallinnan helpottamiseksi ja sitä voidaan muuttaa niin että esimerkiksi vain pieni osa esikäsitellystä raakadatasta viedään pilveen analysoitavaksi tai poikkeustapahtumien käsittely tapahtuu suoraan reunalaitteella. IoT

Edge koostuu kolmesta osasta, joista IoT Edge module:t pyörittävät Azure:n palveluita (esim. Azure Functions, Azure Machine Learning jne.), kolmannen osapuolen tai itse tehtyä koodia ja ne suoritetaan paikallisesti reunalaitteella. Toinen osa eli IoT Edge runtime pyörii jokaisella reunalaitteella ja hallinnoi kullakin laitteella käytteenotettuja moduuleja. Kolmas eli Cloud-based interface käyttöliittymän avulla pystytään hallinnoimaan IoT Edge-laitteita etänä (“What is Azure IoT Edge” 2019).

- *Azure IoT Hub* - IoT Hub on pilvessä isännöity ja hallinnoitava palvelu, joka toimii keskusviestikeskuksena kaksisuuntaiseen viestintään IoT-sovelluksen ja sen hallinnoimien laitteiden välillä. Azure IoT Hub:n avulla voidaan parantaa viestinnän luotettavuutta ja tietoturvaa (“Condition monitoring for industrial IoT” 2021).
- *Azure Event Hubs* - Event Hubs on tarkoitettu tapahtumien käsittelypalveluksi, joka pystyy käsittelemään miljoonia tapahtumia sekunnissa. Tapahtumakeskukseen saapuneet tiedot voidaan sitten joko jatkokäsitellä tai tallentaa myöhempää käyttöä varten ja se toimii tapahtuman julkaisijan ja kuluttajan välisenä osana (“Azure Event Hubs — A big data streaming platform and event ingestion service” 2021).
- *Azure Time Series Insights* - Time Series Insights on Azuren arkkitehtuurissa ns. tapahtuman kuluttaja, jolla voidaan analysoida, tallentaa ja visualisoida IoT-laitteilta saatua dataa. Sovelluksen avulla pystytään havaitsemaan datasta poikkeavuuksia, etsimään tietoa ja löytämään trendejä, jotka ovat tärkeitä teollisen esineiden internetin tarpeiden täyttämässä (“What is Azure Time Series Insights Gen2” 2020).
- *Azure Data Lake* - Data Lake on tarkoitettu varastoimaan suuria määriä dataa, ylläpitämään nopeaa tiedonsiirtonopeutta ja tarkoitettu erityisesti Big Data analytiikalle. Ohjelma on rakennettu Azure Blob Storagen päälle, joka on hierarkkinen kansiorakenne tiedon varastointiin. Tiedostojen hallinnointi on helppoa kansiorakenteiden takia ja tietosuojan parantamiseksi tiedostoille pystytään määrittelemään myös POSIX-oikeuksia (“Introduction to Azure Data Lake Storage Gen2” 2020).
- *Azure Stream Analytics* - Stream Analytics on reaaliaikainen tapahtumankäsittelijä, joka pystyy analysoimaan ja käsittelemään suuria määriä datavirtaa useista eri lähteistä yhtäaikaan (esim. klikkaukset, sensorit, sosiaalisen median syötteet jne.). Data virtaa analysoimalla voidaan käynnistää toimintoja kuten hälytyksiä, syöttää tietoja raportointityökalulle (esim. Power BI) tai tallentaa data myöhempää käyttöä varten (esim.

Azure Data Lake). Stream Analytics:n kyselykieli perustuu SQL-kyselykieleen, jolla voidaan suodattaa, lajitella, koota ja liittää suoratoistotietoja halutulta ajanjaksolta(“Welcome to Azure Stream Analytics” 2021).

- *Azure Functions* - Functions avulla pystytään ajamaan pieniä koodinpätkiä ilman että tarvitsee huolehtia sovellusinfrastruktuurista. Tämä helpottaa sovellusintegraatioiden, mikropalveluiden ja yksinkertaisten API:en tekemistä, mikä tekee siitä hyvän ratkaisun esineiden internetin sovelluksissa(“Condition monitoring for industrial IoT” 2021).

Edellä mainittujen Azuren sovellusten lisäksi löytyy yli 200 muuta käyttökelpoista pilvipalvelusovellusta. Teollisuuden esineiden internetissä ja reunalaskennassa on tärkeää pystyä nopeasti käsittelemään saapuneet viestit, saada aikaan nopea vaste tiettyihin toivottuihin ja ei toivottuihin tapahtumiin, kyetä esittämään kerätty saapunut informaatio käyttäjälle ymmärrettävässä muodossa sekä tallentamaan tarvittavat tiedot jatkokäsittelyä varten. Tämän kaltaisia Azure:n sovelluksia käyttämällä pystytään luomaan esimerkiksi olosuhteiden seurantajärjestelmä teollisuusympäristöön.

5 Matalan viiveen IoT-laitteet markkinoilla

5G-verkkojen hyödyt jäävät olemattomiksi ilman siihen liitettäviä alustoja, jotka hyödyntävät näitä tiedonsiirtonopeuksia. 5G-verkkoja rakennetaan hiljalleen maailmalla ja sen kehitystä seuraa perässä verkkoon liitettävät laitteet. Tässä kappaleessa tutustaan markkinoilta tällä hetkellä kuluttajille ja yrityksille tarjottaviin pienillä viiveillä toimiviin IoT-laitteisiin.

Luvussa 5.1 käydään läpi tällä hetkellä 5G-yhteydellä liitettäviä IoT-laitteita. Tai oikeastaan lähitulevaisuudessa markkinoilta löytyviä, koska tekniikka on vielä tuoretta niin Suomessa kuin maailmallakin ja yritykset eivät ole vahvasti ehtineet tähän kehitykseen mukaan. Seuraavassa luvussa 5.2 käydään läpi muutama 5G:tä hieman hitaamman LTE-M-tekniikkaa tarjoava markkinoilta löytyvä IoT-laite ja kappaleessa 5.3 vielä yksi Wi-Fi 5-verkkotekniikan laite. Viimeisessä kappaleessa 5.4 niputetaan kasaan vielä hakuprosessi ja sen tulokset.

5.1 5G IoT-alustat

Tämän pro gradu-tutkielman kirjoittamisen aikaan, eli vuoden 2021 viimeisellä vuosineljänneksellä, hakukoneilla tuloksia etsiessä löytyi puhtaalla 5G-yhteydellä toimivia IoT-laitteita varsin niukasti. Hakutulokset tuottivat tyypillisimmin verkon luomiseen tarvittavia laitteita kuten 5G-reitittimiä ja reunalaite alustoja sekä IT-yritysten teollisuudelle tai muille yrityksille asiakkaiden toiveiden mukaan luotavia kustomoitavia IoT/IIoT-järjestelmiä ja palveluita. Vahvasti hakutuloksissa esiintyivät myös 5G-älypuhelimet, joita on tullut markkinoille useammaltakin firmalta.

Syitä tähän markkinoiden 5G-laitteiden niukkuuteen voidaan arvailla sillä, että tekniikka on sen verran tuoretta etteivät yritykset ole vielä pitäneet kiirettä omien kuluttajalle suunnattujen laitteiden markkinoille tuonnissa tai niitä ei ole ehditty kehittää, koska 5G-verkkoja ollaan vielä rakentamassa sekä maailmaa vuoden 2019 aiheuttaman COVID-19 pandemien seurauksena aiheutunut sirupula lienee hidastanut myös IoT-laitteiden kehitystä. Kaiken kaikkiaan hakutulosten perusteella mielikuvaksi jäi, että tämän hetken 5G IoT-alustojen pääpaino on enemmän yrityksille tilauksesta luotavien IIoT-ratkaisujen puolella. Kuluttajille tulossa olevia IoT-alustoja löytyi hakutulosten perustella esimerkiksi seuraavia:

- *Qualcomm Flight™ RB5 5G Platform* - Pieniä viiveitä ja hyvää suorituskykyä vaativia järjestelmiä ajateltaessa dronet kuuluvat 5G-tekniikasta hyötyviin. Qualcomm:n ja ModalAI:n yhteistyössä luoma Qualcomm Flight™ RB5 5G Platform kuvassa 5 on ensimmäisiä markkinoille ilmestyvistä lennätettävistä autonomisista 5G-yhteydellä toimivista droneista. Dronessa itsessään on sisäänrakennettu reunalaskenta-alusta, jolloin se pystyy nopeaan päätöksentekoon (“5 Things to Know About 5G Drones” 2021). Tekoälyn ohjaama ja itsestään liikkuvaa ilma-alusta voidaan käyttää esimerkiksi pienien pakettien kuljettamiseen.
- *Samea SENSORIIS®* - Samea SENSORIIS® on puolestaan IoT-maailman äly-koti ratkaisu, jonka tarkoitus on seurata ja raportoida rakennuksen sisällä tapahtuvista valon, melun ja ilmanlaadun muutoksista sekä ei toivottujen vierailijoiden havaitsemisesta. Laite toimii 5G-yhteydellä, mutta myös myös monella muulla langattomalla tekniikalla kuten LoRa ja Bluetooth (“SENSORIIS®: Multi-protocol Wireless Sensor” 2021). Sensoriis on "kaikki ominaisuudet samassa paketissa-ratkaisu ja laite kerää paljon tietoa sisätilan olosuhteista, mutta ei niin merkittävästi että 5G-yhteys tuottaisi kuitenkaan merkittävää etua palvelun laadun toteutumiseen.
- *Virebox.AI* - Suomalaisen Virelabs firman Virebox.AI ei oikeastaan ole valmis IoT-laite vaan kehitysalusta, jonka pohjalle on helppo rakentaa 5G-yhteydellä toimiva asiakkaan tarpeisiin sopiva IoT-ratkaisu. Alustalla pystytään toteuttamaan reunalaskenta ratkaisut ennen tietojen lähettämistä pilveen ja se sisältää järjestelmärajapinnat tunnetuimpiin (AWS, GoogleCloud ja Azure) pilvipalveluihin. Alustaan voidaan liittää esimerkiksi kameroita, sensoreita, mikrofoneja jne. analogisilla tai digitaalisilla liitännöillä (“VIREBOX Koneälypohjaisia IoT-ratkaisuja nopeammin kuin koskaan” 2021).

Tietoa etsittäessä 5G-yhteydellä toimivista IoT-laitteista on sitä toistaiseksi tarjolla varsin niukasti eikä tuotteita löydy tällä hetkellä juurikaan verkkokauppojen sivuilta. Jos ajatellaan edellä esitellyistä IoT-alueista, Qualcomm Flight™ RB5 5G Platform drone on täydellinen esimerkki siitä missä käyttökohteissa nopeita 5G-yhteyksiä voidaan hyödyntää parhaiten. Virebox.AI alustalla on mahdollista myös kehittää monimutkaisiakin tekoälysovelluksia esimerkiksi alustaan liitettävällä kameralla erilaisia konenäkösovellutuksia.



Kuvio 5. Qualcomm Flight™ RB5 5G Platform

5.2 LTE-M IoT-alustat

Tässä kappaleessa tutustutaan muutamaiin 5G-tekniikkaa hieman hitaampiin LTE-M IoT-alustoihin, joita tällä hetkellä on tarjolla markkinoilla. 5G-yhteydellä toimivien laitteiden tapaan näitäkään ei hakutuloksissa esiintynyt vakuuttavasti, mutta esitteillä seuraavat:

- *Found LTE - GPS Dog Tracker* - Pebblebee:n tekemä Found LTE on lemmikkien paikannus IoT-laite, joka toimii LTE-M taajuuksilla ja paikannus perustuu POLTE-paikannustekniikkaan. Seuranta tapahtuu kännykkäsovelluksen karttanäytöltä, josta voidaan asettaa lemmikille "virtuaaliaita", jonka ylittäessään käyttäjälle lähetetään hälytys. Lemmikin/auton/pyörän/jne. liikeistä voidaan tallentaa sovelluksen myös historiatietoja seurattavan kohteen liikkeistä("GET PEACE OF MIND with the Found LTE - GPS Dog Tracker" 2021).
- *WISE-4250AS* - WISE-4250AS on luvussa 5.1 esitellyn Virebox.AI:n kaltainen modulaarinen IoT- ratkaisu teollisuusympäristön puolelle, joka tukee useita langattomia tekniikoita (WiFi 2.4GHz/5GHz, LoRaWAN, NB-IoT) LTE-M mukaan lukien("WISE-4250AS for Azure Sphere" 2021). Laitteen sisällä on Microsoft Azure Sphere sertifioitu mikrokontrolleri Linux-pohjaisella Azure Sphere OS käyttöjärjestelmällä, joka

mahdollistaa IoT-laitteen liittämisen internetiin suojatusti siten että sitä voidaan päivittää, ohjata, valvoa ja hallita etänä (“What is Azure Sphere?” 2021). Modulääriseen ratkaisuun voidaan liittää esimerkiksi sensoreita, joista mitattu data lähetetään langattomasti Azuren pilvipalveluun.

- *Progressive-IOT Wireless open / close logger* - Langaton kulunseurantaan tarkoitettu Progressive-IOT alustalla voidaan havaita oven aukaisu/sulkemis-tapahtumat, josta tieto lähetetään yrityksen omaan Progressive-IOT Cloud tai mihinkä tahansa toiseen pilvipalveluun. Alustan sensori havaitsee tilan muutoksen magneetin avulla. LTE-M mallilla on mahdollista lähettää data myös NB-IoT tekniikalla ja laite sisältää myös Bluetooth LE mahdollisuuden. Laite on muunneltavissa ja sen sensori voidaan vaihtaa saman yrityksen tekemään esim. lämpötilasensoriin (“Progressive-IOT Wireless open / close logger - NB-IoT” 2021).

Tässä kappaleessa esiteltyt IoT-laitteet ovat varsin yksinkertaisia ratkaisuja, joiden mittamista tiedoista voitaisiin lähettää tiedot myös muita suuremman viiveen langattomia tekniikoita käyttämällä. Found LTE on varsin älykäs ratkaisu LTE-verkkojen hyödyntämiseen kohteen paikantamisessa siten että tieto kohteen liikkeistä saadaan reaaliaikaisesti ja nopeasti käyttäjälle. WISE-4250AS:n hyöty moduläärisuuden lisäksi on siinä, että sen sisältämä Azure Sphere:llä voidaan paremmin taata langattoman laitteen tietoturvallisuus ja siten se soveltuukin hyvin teollisuuden puolen ratkaisuihin, joissa ei haluta riskeerata tietojen päätymistä ei toivotuille tahoille. Tällä voidaan toteuttaa myös LTE-M mahdollisuuden ansios-ta kriittisiä järjestelmiä teollisuuden puolelle, joissa tarvitaan reagoida nopeasti sensoreilta saapuvaan dataan.

5.3 Wifi-5/6-alustat

Wi-Fi 5/6 yhteydellä toimivia laitteita etsittäessä hakuprosessissa hankaluudeksi muodostui laitteen langattoman yhteyden määrittelymättömyys. Sana "Wi-Fi" esiintyy luonnollisestikin useassakin laitteen mainoksessa ja tuotteen esittelysivulla, mutta laitteen yhteyden laatuluokka oli usein piilotettu eikä tietoa välttämättä löydy laitteen tuoteselosteessakaan. Seuraavaksi esitellään kuitenkin yksi mielenkiintoinen löydös:

- *Hololens 2* - 802.11ac eli Wi-Fi 5-yhteydellä kuvassa 6 toimiva Hololens 2 on teollisuuden, terveydenhuoltoon, suunnitteluun tai vaikka opetukseen tarkoitettu virtuaalilasiratkaisu. Lasit ovat Microsoftin suunnittelemat ja niihin löytyykin esimerkkiprojekteja tuotekehitykseen Microsoftin dokumentaatiosta. Luonnollisestikin tämän saa myös yhdistettyä Microsoft Azuren pilvipalveluihin. Ominaisuuksista mainittakaan käden liikkeenseuranta, silmän liikkeenseuranta ja mahdollisuus äänikomentojen vastaanottoon. Näillä voidaankin luoda hyvinkin monimutkaisia toimintoja ja siksi matalaviiveinen Wi-Fi onkin omiaan valtaviin tiedonsiirtomäärien liikutteluun laitteen ja verkon välillä (“Hololens 2” 2022).



Kuvio 6. Hololens 2 (“Hololens 2” 2022)

Vaikka Wi-Fi 5/6 tyyppisiä IoT-ratkaisuja löytyi vähän, on Hololens 2 kuitenkin erinomainen esimerkki siitä miten matalaviiveisiä yhteyksiä voidaan hyödyntää lähiverkossakin. Kuluttajalle usein kuitenkin riittää tietää, että hänelle myytävä tuote yhdistyy hänen kotiverkkoonsa jolloin yhteyden laatua ei ole mielekästä markkinoida. Varsinkin, kun verkkostandardi sanat 802.11ac/802.11ax/Wi-Fi 5 ja Wi-Fi 6 sekoittavat alaa tuntemattoman pään helposti ja eivät kerro tietämättömälle kuluttajalle yhtään mitään. Siksi verkkostandardia mainostetaan usein Hololens 2:n kaltaisissa tilanteissa, joka tuo merkittävää arvoa sen houkuttelevuuteen.

5.4 5G IoT:n nykytilanne

Hakukoneella tehtiin hakua useilla eri sanakombinaatioilla. *"IoT"*, *"device"*, *"5G"*, *"LTE"*, *"LTE-M"*, *"internet of things"*, *"smart device"*, *"Wi-Fi 5/6"*, *"Wi-Fi 802.11ac/802.11ax"*, *"Azure"*, *"cloud service"* ja *"cellular connection"* olivat haussa eniten käytetyt hakusanat. Hakua toteutettiin myös vastaavilla suomenkielisillä hakusanoilla. Wi-Fi 5/6-yhteydellä toimivasta laitteista tehtiin tähän työhön myös hakua, mutta tulokset jäivät hyvin niukaksi sillä valmistajat eivät usein määritelleet verkkosivuilla tai laitteiden esitteissä laitteen verkkostandardia. Siksi mukaan kerättiin vain muutamat mielenkiintoisimmat verkosta löytyneet ratkaisut.

Oman empiirisen tutkimuksen mukaan sana "IoT" tai "internet of things" eivät esiintyneet useimmissa laitteiden markkinoinneissa lainkaan tai sitten heikosti. Parempia hakutuloksia saatiin aikaiseksi esim. "smart device"-hakusanalla, jolla asiakkaille tuotteita markkinoitiin. Syy tähän saattaa olla, että esineiden internet ei ole vielä tarttunut arkikieleen muuta kuin alan ihmisten keskuudessa. Sanoja "5G", "LTE-M" tai "Wi-Fi 5/6" käytettiin markkinoitaessa usein vain niissä tapauksissa, kun nopean yhteyden mainostamisesta katsottiin olevan hyötyä tuotteen myymisessä asiakkaalle ja tästä esimerkkinä luvussa 5.1 mainittu Qualcomm Flight™ RB5 5G Platform. Niin kutsuttuja turhia matalan viiveen ratkaisujakin löytyi, josta esimerkkinä Samea SENSORIIS®. Ratkaisu ei oikeastaan "tarvitse" nopeita 5G-yhteyksiä toimiakseen tyydyttävällä tavalla. Täysin eri asia olisi, jos laite olisi selkeästi luotu mittaamaan vaativia teollisuuden olosuhteita vaativissa ympäristöissä, mutta tavalliselle kuluttajalle riittää hitaammatkin yhteydet oman asunnon sisäilman mittaamiseen.

Hakutuloksia hallitsivat eniten ns. asiakkaalle tarpeen mukaan kustomoitavat IoT/IIoT-ratkaisut sekä reitittimet ja puhelimet. Tämä on toisaalta loogista, koska matalan viiveen yhteydet palvelevat parhaiten teollisuuden automaatioprosesseissa, joissa tarvitaan reaaliaikaista ja nopeasti päivittyvää tietoa työn vaiheista. Koska nämä laitteet ovat asiakkaalle kustomoitavia, tietoa löytyi näistä varsin vähän. Tavalliselle kuluttajalle tutuinpana "IoT-laitteena" tuttu kännykkä palvelee parhaiten kuluttajan nopeiden yhteyksien tarpeita. Kuluttajalle myytävä virtuaalitodellisuus ja pilvipelaaminen taas saattavat olla tulevaisuudessa kohteita, jotka viimeistään räjäyttävät pankin ja näissä nopeat tietoliikenneyhteydet pääsevät ansaitsemaansa arvoonsa.

6 Tutkimuksen toteutus

Tässä luvussa käydään läpi tutkimuksen toteutus, jossa simuloidaan IoT-laitteen yhteydenottoa Azuren pilvipalveluun. Tarkoituksena on selvittää viivettä pilvipalveluun ja yhteyden nopeutta simuloimalla laitetta matalaviiveistä yhteyttä vaativassa järjestelmässä. Tutkimukseen koitettiin luvun 5 mukaisesti löytää markkinoilta 5G-yhteydellä toimivaa IoT-laitetta.

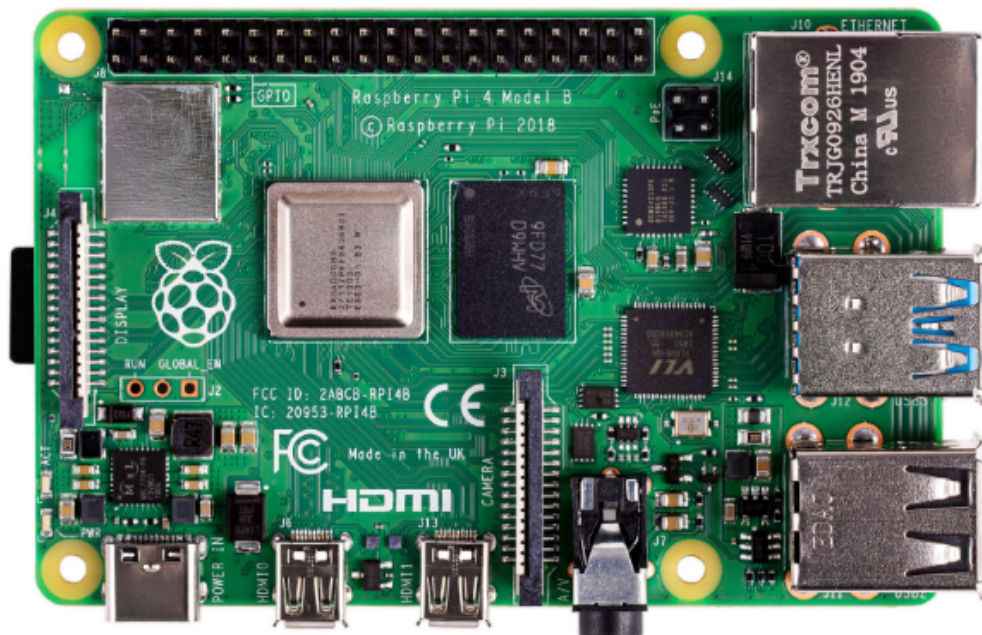
Ongelmaksi tutkimuksen toivotunlaiselle toteuttamiselle muodostui IoT-laitteiden saatavuus. Tämän gradun kirjoittamishetkellä 5G-yhteydellä toimivia laitteita on saatavilla varsin vähän, hinta muodostui liian kalliiksi tilattaessa asiakkaalle kustomoitua IoT-järjestelmää yrityksiltä tai IoT-järjestelmä ei kyennyt muodostamaan yhteyttä Azuren pilvipalveluun. Tutkimukseen sovellettiin matala viiveisellä (engl. low latency) Wi-Fi 5/802.11ac yhteydellä toimivaa Raspberry Pi 4 mikrokontrolleria lähettämään dataa kirjoittajan kotiverkosta yliopiston Microsoft Azure pilvipalveluun. Tässä työssä simuloidaan langattomilla yhteyksillä toimivaa sisäilmamittaria, joka lähettää IoT Hubille lämpötilan ja ilmankosteuden 2 sekunnin välein.

Tutkimuksessa käytettyjä komponentteja ja yhteyden muodostukseen käytettyjä tekniikoita on esitelty kappaleessa 6.1. Kappaleessa 6.2 käydään läpi tarkemmin kuinka datan lähetys tapahtuu Raspberry Pi laitteelta Azure:n pilvipalveluun. Vertailukohdaksi haettiin kappaleessa 6.3 myös muista langattomien yhteyksien viiveistä tietoa. Lopuksi kappaleessa 6.4 käydään läpi tutkimuksessa saadut tulokset ja yhteenveto.

6.1 Komponentit ja tekniikat

IoT-laitetta simuloivana laitteena käytetään tutkimuksessa Raspberry Pi 4 B tietokonetta. Tämä on tuorein malli Raspberry Pi tuoteperheestä. Samasta mallista on olemassa 1GB, 2GB, 4GB or 8GB LPDDR4 muistilla varustetut versiot markkinoilla, joista tässä käytetään 4GB-versiota. Kaikki versiot ovat muuten yhtäläisiä keskenään ja ne on varustettu 1.5GHz neliydin 64-bittisellä ARM-prosessorilla. Tietokoneella on tuki 2.4 GHz ja 5.0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac WLAN-yhteyksille sekä tuki Bluetooth 5.0 yhteydelle (“Raspberry Pi 4 Computer Model B” 2021). Työssä käytetty Raspberry Pi 4 tietokone on näkyvillä kuvassa

7.



Kuvio 7. Raspberry Pi 4 B tietokone(“Raspberry Pi 4 Computer Model B” 2021)

Tässä työssä halutaan laitteella muodostaa IEEE 802.11ac tai toiselta nimeltään Wi-Fi 5-yhteys mahdollisimman pienen viiveen saavuttamiseksi tietokoneelta Azure:n pilvipalveluun. Wi-Fi teknologian IEEE 802.11ax/Wi-Fi 6-standardin edeltäjä 802.11ac/Wi-Fi 5 tekniikka toimii ainoastaan 5 GHz:n taajuudella. Tekniikalla voidaan 256 - QAM modulaatiolla ja 160 MHz:n kaistanleveydellä saavuttaa teoreettisesti n. 1 Gbps:n nopeus, mutta todellisuudessa nopeus on tätä pienempi(Parekha ja Patel 2018).

6.2 Simuloinnin toiminnallisuus

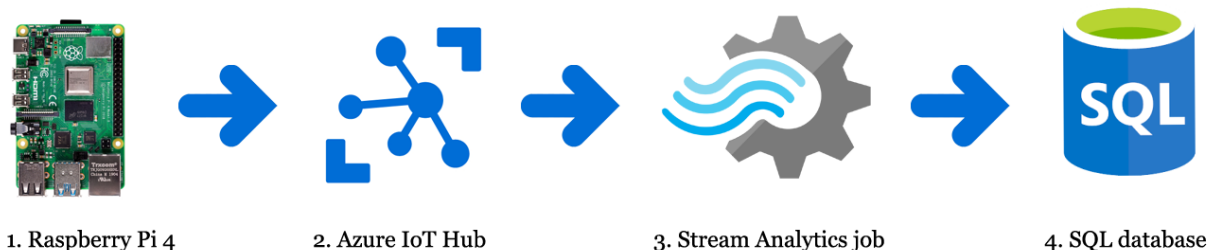
Simulointi toteutetaan siis yhdistämällä Raspberry Pi 4 tietokone langattomastikirjoittajan kotiverkkoon ja lähetetään dataa tietokoneelta Azure Hub:lle ja mitataan sitten viive paketin lähettämisen ja saapumisen välillä. Jyväskylän yliopistolla on valmiina käytössään Azuren pilvipalvelu, johon pääsee kirjautumaan osoitteessa <https://portal.azure.com>.

Jyväskylän yliopistolla on valmiiksi luotu IoT Hub, jota tässä tutkimuksessa hyödynnettiin. IoT Hub:n sisälle luodaan, jokaiselle IoT-laitteelle oma virtuaalinen laitepari, jonka avaimen

avulla IoT-laite yhdistetään Hub:n kanssa. Jyväskylän yliopiston IoT Hub:lla on käytössä kirjoittamishetkellä S1-luokan tilaus mikä tarkoittaa, että päivän aikana IoT-laitteilta IoT Hub:lle voidaan lähettää sille rekisteröidyistä laitteista yhteensä 400 000 viestiä, joiden koko on maksimissaan 256 KB(“Reference - IoT Hub quotas and throttling” 2021).

Raspberry Pi laitteelle luotu laitepari rekisteröitiin IoT Hub:lle ja laiteparilla automaattisesti luotu "Primary Connection String" toimii avaimena, jolla IoT-laite pystyy ottamaan yhteyttä IoT Hub:lle. Työssä simuloidaan sisäilmamittaria, joka lähettää dataa laitteen ilmanlaadun olosuhteista joka toinen sekunti. Raspberry Pi 4 tietokoneeseen ei tässä työssä liitetä antureita vaan data luodaan koodin sisällä satunnaisesti. Kieleksi valittiin Python ja satunnaisdatan lähetykseen käytettävä ohjelmakoodi on liitteenä tämän työn lopussa kuvassa 13. Kuvasta on häivytetty tietoturvasyistä "CONNECTION_STRING", joka on IoT Hub-laitteelle luodun laiteparin "Primary Connection String", jolla yhteys muodostetaan. Esivalmisteluissa Raspberry Pi laitteelle asennettiin pythonille "azure-iot-device" - ja "azure-iot-hub" -kirjastot, jotka sisältävät valmiit metodit viestin muotoon sekä viestin lähettämiseen ja yhteydenottoon Azure IoT Hub:lle.

Viesti lähetetään Hub:lle käyttämällä kahta tekniikkaa kolmella eri skenaariolla. Toisella asetetaan Samsung Galazy A51 5G matkapuhelin mobiilitukiasemaksi, jonka kautta LTE-yhteys jaetaan Raspberry Pi alustan käyttöön ja sama testi toistetaan käyttäen 5G-yhteyttä. Toisella tavalla otetaan Raspberry Pi:llä vertailun vuoksi yhteys 802.11ac standardin langattomaan reitittimeen. Jälkimmäisellä haetaan vertailukohtaa solukkojärjestelmän kautta lähetetyille viestille.



Kuvio 8. Viestiketjuun osallistuvat pääkomponentit

IoT Hub:lle saavuttuaan viesti halutaan yleensä reitittää sovelluskohteesta riippuen eri Azuren ohjelmille, joita esiteltiin luvussa 4.4. Lähetettäessä viesti IoT-laitteelta Azure IoT Hub:lle ja sen jälkeen ensimmäinen reititys saattaa aiheuttaa viivettä, joka on keskimääräisessä osassa tapauksista alle 500 ms:a dokumentaation mukaan (“Use IoT Hub message routing to send device-to-cloud messages to different endpoints” 2021). Tässä työssä tuota viivettä ei kuitenkaan aiheudu mittausdataan, koska viive lasketaan ainoastaan laitteelta IoT Hub:lle ja saapumisaika tallentuu viestin dataan.

Kappaleessa 4.4 käytiin läpi joitain Azuren ohjelmia mahdollisessa esineiden internetin sovellusarkkitehtuurissa. Azure IoT Hub toimii siis viestikeskukseksi kaksisuuntaisessa viestinnässä pilven ja sen hallinnoimien laitteiden välillä, mutta tässä työssä Hubille lähetetään yksisuuntainen yhteydenotto. Datan kulku on esitetty kuvassa 8. Aikaleima tallennetaan siis laitteella juuri ennen lähetettävää viestiä ja tallennetaan viestin payloadiin JSON-formaatissa yhdessä simuloidun ilmanlaadun datan kanssa. Hub tallentaa automaattisesti sille saapuvista viesteistä telemetriatietona saapumisajan, joka sitten voidaan lukea ja tallentaa pilvessä SQL-tietokantaan.

The screenshot shows the Stream Analytics job configuration interface. At the top, there is a SQL query editor with the following query:

```

1 SELECT temperature AS temperature, humidity AS humidity, co2 AS co2, timeInString AS dev_timestamp, EventEnqueuedUtcTime AS hub_timestamp
2 INTO [Output]
3 FROM [Input]

```

Below the query editor, the 'Test results' tab is active, displaying a table of event data. The table has the following columns: temperature, humidity, co2, timeInString, EventProcessedUtcTime, P..., and EventEnqueuedUtcTime. The data rows show various sensor readings and timestamps.

temperature	humidity	co2	timeInString	EventProcessedUtcTime	P...	EventEnqueuedUtcTime
31.54517610738822	67.25944047249499	35.45143235530143	"2022-01-16T05:59:22.4293180"	"2022-01-16T06:14:55.689602..."	19	"2022-01-16T05:59:22.5450000Z"
31.78239784097562	67.0288246662848	21.04520105963959	"2022-01-16T05:59:12.3557360"	"2022-01-16T06:14:55.689602..."	19	"2022-01-16T05:59:12.5260000Z"
32.218969783522354	74.27599331131975	24.20782667469645	"2022-01-16T05:59:02.2228830"	"2022-01-16T06:14:55.689602..."	19	"2022-01-16T05:59:02.2890000Z"
34.31034507904568	62.944575379120366	29.5001313627707	"2022-01-16T05:58:52.1529000"	"2022-01-16T06:14:55.689602..."	19	"2022-01-16T05:58:52.3960000Z"
25.600006489921117	79.56364536157794	21.299720897792497	"2022-01-16T05:58:42.0829320"	"2022-01-16T06:14:55.689602..."	19	"2022-01-16T05:58:42.1560000Z"
24.83618056288325	64.76538710379829	36.14386760924492	"2022-01-16T05:58:32.0232700"	"2022-01-16T06:14:55.689602..."	19	"2022-01-16T05:58:32.1710000Z"

Kuvio 9. Stream Analytics job ja datan ohjaus kyselyllä

Stream Analytics job tapahtumankäsittelijällä luodaan kysely, joka kerää saapuneet viestit halutulta IoT Hub:lta ja välitetään ne eteenpäin Azure SQL database:n säilöttäväksi. Stream Analytics:n kyselykieli on T-SQL muotoista eli hyvin samanmuotoista SQL-kielen kanssa. Työssä hyödynnettiin Jyväskylän yliopistolla valmiiksi luotua Stream Analytics palve-

lua. Stream Analytics-palvelulla voidaan määrittää "Input- ja "Output-putkituksia datavirran ohjaamiseen haluttuihin palveluihin Azuren palveluiden sisällä. Palvelulla voitaisiin myös luoda funktioita datan parsimiseksi luettavaan muotoon, mutta tässä ei ominaisuutta tarvita, koska saapunut on tutkimuksessa valmiiksi oikean muotoista.

Stream Analytics:lle luotiin Input-job, jolle annettiin tehtäväksi kerätä hubilta saapuneet viestit sekä Output job, jolle annettiin tehtäväksi ohjata viestit haluttuun tauluun Azure SQL database-tietokantaan. Jyväskylän yliopiston toimesta on luotu valmis tietokanta, jota tässä työssä myös hyödynnettiin. Kuvassa 9 on esitettyä tutkimuksessa käytetty kysely mallidatoinen. Data ohjataan "INTO" -komennolla luotuu SQL-tietokantaan ja "FROM" -komennolla valitaan mistä data kerätään, koska sama Stream Analytics job voi sisältää useita Input- ja Output-komentoja. Komentojen kohde osoitteet on häivytetty kuvasta tietoturvasyistä. Kuvassa näkyy myös, että esimerkiksi liitteen kuvassa 13 lähetetyssä JSON-viestissä avaimella "timeInString" tallennettu viestin lähtöaika muutetaan Stream Analytics-kyselyssä "dev_timestamp" sarakkeelle SQL-tietokantaan.

SQL-tietokantaan luotiin tutkimusta varten uusi SQL-taulu. Tauluun luotiin kolme saraketta simuloidulle ilmanlaadun datalle ja yksi sarake datan lähtö- ja saapumisajalle. SQL-tietokannassa luodaan SQL-kysely, jolla haetaan laitteelta lähetetyt viestit ja tallennetaan käsiteltäväksi JSON-muodossa. Kyselyyn riittää kerätä ainoastaan lähtö- ja saapumisaika, joka kuvan 10 osoittamalla tavalla haetaan "TOP" -komennolla N-kappaletta viimeisintä tauluun kirjoitettua data riviä. Kuvasta on häivytetty tietoturvasyistä viittaukset tietokannan nimeen. Erottamalla laitteelta muodostetun viestin aikaleima IoT Hub:n telemetria tiedon saapumisajasta saadaan laskettua viestin viive. 80:n viestin viiveen keskiarvosta vedetään yhteenveto langattoman verkon viiveestä IoT-laitteen ja Azuren pilvipalvelun välillä. Kaikista langattomista verkkotekniikoista tehtiin lisäksi suorituskykytestaus verkkosivuston <https://www.nopeustesti.com/> mukainen tiedonsiirtonopeuden testaus tutkimuksen jälkeen.

6.3 Viiveet muissa langattomissa verkoissa

Terminä "matala viive" määritellään monellakin tavalla. Toiset määrittelevät sen "yhteyksiksi, jotka kykenevät kuljettamaan suuren määrän dataa mahdollisimman pienellä viiveellä" ja

Query 1 ✕

Cancel query

```

1 SELECT TOP 100 hub_timestamp, dev_timestamp
2 FROM [dbo].[ ]
    
```

Results Messages

Search to filter items...

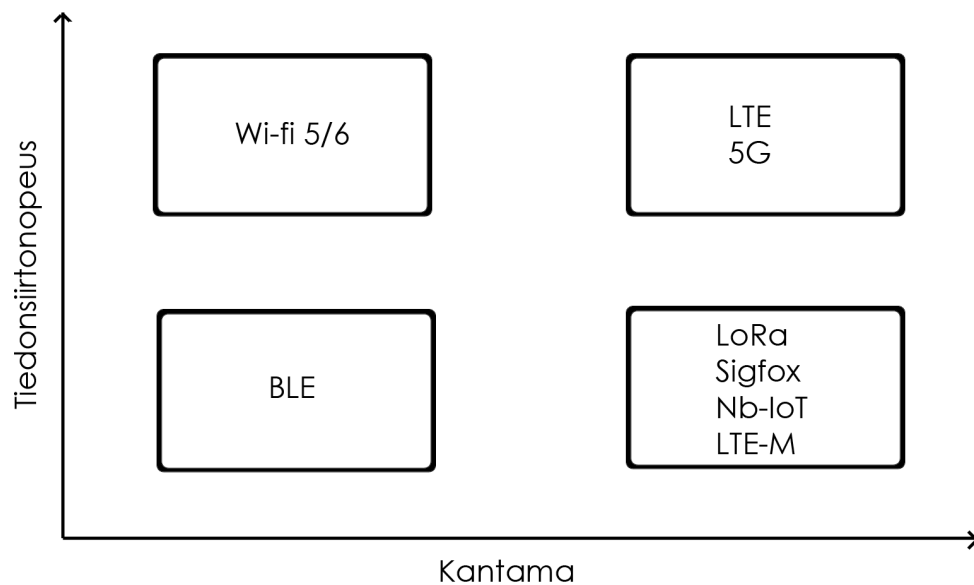
hub_timestamp	dev_timestamp
2022-01-16T05:55:43.9470000	2022-01-16T05:55:42.941274
2022-01-16T05:58:12.0600000	2022-01-16T05:58:11.876456
2022-01-16T05:57:21.6270000	2022-01-16T05:57:21.385427

Kuvio 10. Tutkimuksen SQL-kysely Azuren tietokannassa

toiset taas "yhteyksiksi, jotka on optimoitu mahdollisimman pienelle viiveelle". Cisco taas määrittelee termin tarkemmin "yhteyksiksi, joiden verkon viiveet voidaan mitata millisekunteina" eli verkon viive on välillä 1000 - 1 millisekuntia ("What Is Low Latency?" 2021).

Muista esineiden internetin langattomista verkkotekniikoista löytyy jonkin verran tutkimustietoa. Koska tämä pro gradu-tutkielman mittaus suoritetaan mittaamalla yksisuuntaista viivettä (engl. one way delay/end-to-end latency) datan lähtö- ja päätepisteen välillä, haettiin vertailukohdaksi muiden langattomien verkkotekniikoiden yksisuuntaista viestintää mittaavia tutkimuksia. Nämä eivät ole kuitenkaan täysin vertailukelpoisia vaan suuntaa antavia, koska testiparametrit vaihtelevat suuresti toisistaan. Testiparametreista muun muassa lähetysmatkan etäisyys ja esteet, yhteydessä olevien käyttäjien määrät sekä pakettikoko vaikuttavat hyvin suuresti viestin kulkeutumiseen ja viiveeseen.

Esineiden internetin langattomia verkkotekniikoita on vaikea lajitella niiden viiveen perusteella, koska paketin kulkeutumiseen vaikuttaa niin moni tekijä. Helpompaa onkin lajitella ne kantaman ja tiedonsiirtonopeuden perusteella. Kuvassa 11 on jaoteltuna karkeasti eri langattomat tiedonsiirtotekniikat näiden kahden perusteella. Tiedonsiirtonopeuden huippua edustavat Wi-Fi 5/6-, LTE- ja 5G-tiedonsiirtotekniikat. Solukkojärjestelmä, LoRa, Sigfox sekä Nb-IoT tekniikat ovat näistä huomattavasti pitempikantoisempia kuten kappaleessa 3 langattomia tiedonsiirtotekniikkiin tutustuttaessa käsiteltiin ja sijoittuvat siten kantamassa oikealle. Vastaavasti BLE, LTE-M, LoRa, Sigfox ja Nb-IoT tiedonsiirtotekniikat siirtävät huomattavasti pienempiä tiedonsiirtomääriä aikayksikköä kohden. LoRa, Sigfox ja Nb-IoT pääsevät kuitenkin näistä merkittävästi pitemmälle kantamalle. LTE-M:n sijoittelu riippuu vertailukohdasta ja voitaisiin helposti sijoitella myös LTE:n ja 5G:n kanssa samaan laatikkoon, mutta näihin verrattuna kykenee kuitenkin maksimitiedonsiirtonopeuksiltaan pienempiin lukuihin.



Kuvio 11. Esineiden internetin langattomat verkkotekniikat etäisyyden mukaan jaoteltuna

Pötsch ym. LoRaWAN-tutkimuksessa (Pötsch ja Hammer 2019) mitattiin luokan A LoRaWAN-laitetta ja sen viivettä sekä soveltuvuutta IIoT-sovellukseen. Tutkimuksessa käytettiin rakennettiin Raspberry Pi alustan pohjalle yhdyskäytävä välittämään tiedot eteenpäin IoT-laitteelta 3G-yhteydellä ydinverkkoon. LoRa-lähetyksen tehokkuus riippuu tekniikan levityskerto-

men SF(engl. spreading factor) arvosta, joka vaihtelee välillä 7-12. Tehokkaimmalla arvolla 7 saavutetaan pienin ilmaviive ToA (engl. Time-on-Air) (<100 ms), mutta lähetyksen kantama kärsii verrattuna suurempiin SF-arvoihin. Tämän lisäksi latenssiin vaikuttaa paketin koko, joka simulaatiossa vaihteli 8 ja 50 tavun välillä. Tutkimuksessa pystyttiin saavuttamaan alle 400 ms:n viiveet IoT-laitteen ja palvelimen välillä pienimmällä SF-arvolla. Viiveen hajoa kuitenkin vaihteli välillä 400 - 2000 ms:a ja pysyi suhteellisen tasaisena eri pakettikoilla. Suuremmalla SF-arvolla 12 käytettävissä pitemmän etäisyyden sovelluksissa viive oli jo 2500 - 3000 ms:n luokkaa. Tutkimuksessakin kuitenkin todettiin, että laskennallisesti pienin osa tuosta viiveestä syntyi LoRa-lähetyksen ilmaviiveestä ja muut viiveeseen vaikuttavat komponentit tuovat valtaosan eli n. 1000 ms:a viiveestä. Keskimäärin 235 ms:a tuosta tutkimuksen mukaan laskennallisesti kului LoRaWAN-verkossa ja sovellusserverillä(Pötsch ja Hammer 2019).

Cao ym. lyhyen kantaman langattoman BLE (engl. Bluetooth Low Energy) tutkimuksessa(Cao ym. 2021) vertailtiin kahden eri BLE Mesh-verkon verkkotopologian eroa viestin kulkeutumiseen verkon sisällä. Tutkimus simuloitiin nRF52832 Bluetooth-mikropiirillä ja viesti lähetettiin matkapuhelimeen, joka tässä toimii verkon tähtitopologian isäntänä. Koska käytössä oli vain yksi noodi, loput verkossa kuluneista viiveistä suoritettiin laskennallisesti yhden hypyn viiveestä. Perinteisellä BLE-hajaverkolla yhden hypyn viiveet olivat noin 15 ms:n luokkaa, mutta kilpailevalla HBMN (engl. Hierarchical BLE mesh network) arkkitehtuurilla saavutettiin yhden hypyn sisällä n. 10 ms:n viive(Cao ym. 2021). Viive ei ole varsinainen päästä päähän viive vaan siihen täytyisi laskea lisäksi paketin verkossa kulunut aika, jotta se olisi vertailukelpoinen, mutta antaa kuitenkin suuntaa nopeudesta.

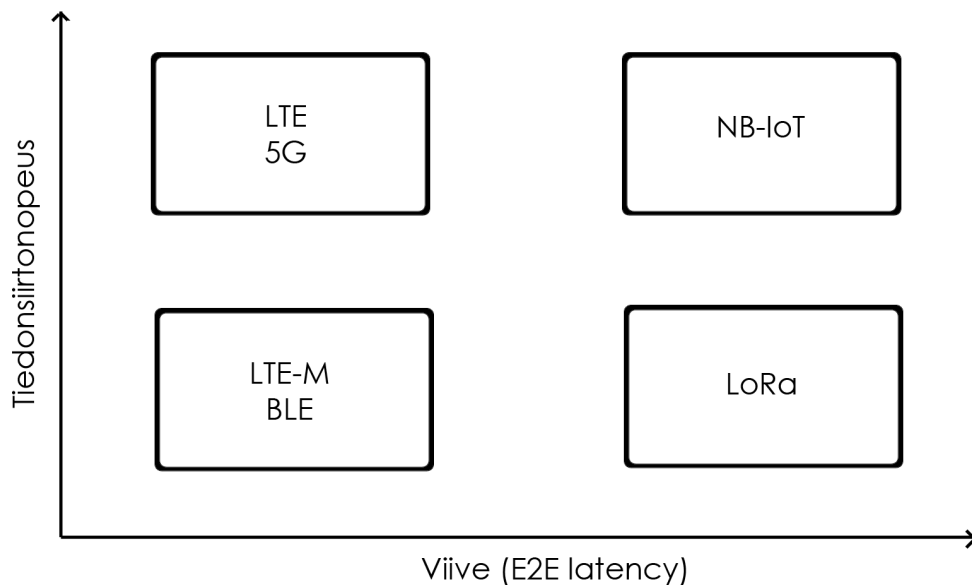
Mobiiliverkkotekniikoiden fyysisillä laitteilla viiveitä mittaavia tutkimuksia löytyy huonosti. Ilmeisesti, koska näiden kantamat ovat huomattavasti muita verkkotekniikoita pitemmät ja siten työläämmät mitata ja koska etäisyys on vaikuttava tekijä niin siksi niitä on mallinnettu erilaisilla simulaatio-ohjelmilla. Dawaliby ym. LTE- ja LTE-M-tekniikoita vertailevassa tutkimuksessa (Dawaliby, Bradai ja Pousset 2016) vertailtiin tekniikoiden suorituskykyä laskennallisesti LENA LTE-moduulin avoimella verkkosimulaattorilla. Testialustassa lähetettiin 1000 tavun paketteja 1 sekunnin välein simuloidulta IoT-laitteelta datan päätepisteelle vaihtelevilla etäisyyksillä. Tutkimuksessa IoT-laitteen etäisyydestä radiomastoon aina 12 ki-

lometriin asti viive pysyi noin 25 ms:n paikkeilla sekä LTE- ja LTE-M-tekniikoissa. LTE-M suoriutui kuitenkin hieman paremmin vatsinkin, kun etäisyys kasvoi yli 12 kilometriin. Molempien tekniikoiden verkon kapasiteetti pysyi stabiilina sen ollessa n. 1000 Kbps:a, mutta yli 12 km:n etäisyydellä LTE lähti jyrkkään laskuun LTE-M-tekniikan kyetessä kuitenkin vielä 200 Kbps:n tehokkuuteen 40 kilometrin etäisyydellä (Dawaliby, Bradai ja Pousset 2016).

Virdis ym. tutkimuksessa (Virdis ym. 2020) puolestaan mallinnettiin kahdella simulaatio-ohjelmalla käyttäjälaitteen viivettä MEC-arkkitehtuurissa yhdessä 4G- ja 5G-verkkojen kanssa. Simulaatio-ohjelmalla tutkimuksessa MEC isäntä simuloitiin CoFluent:lla ja verkkoyhteydet Simu5G-ohjelmalla. Simuloinnissa tehtiin oletuksia paremmiksi, että LTE-verkossa RAN- ja MEC-viiveeksi määriteltiin 15 ms:a, ei-itsenäisessä 5G-verkossa 200 μ s:a ja itsenäisessä 5G-verkossa 100 μ s:a. Simulaation tuloksista käy ilmi että 24:llä yhtäaikaista käyttäjällä ja paketin kehys koolla 2000 tavua 4G-verkossa viive oli n. 24 ms:a ja 24000 tavulla lähemmäs 40 ms:a. Vastaavilla pakettikoolla ei-itsenäisessä 5G-verkossa viiveet olivat n. 6 ms:a ja 14 ms:a itsenäisessä 5G-verkossa viiveet olivat n. 2 ms:a ja 3 ms:a (Virdis ym. 2020).

Sultania ym. tutkimuksessa (Sultania, Mahfoudhi ja Famaey 2020) tutkittiin LTE-kantoaalloilla liikkuvan ja NB-IoT yhteydellä toimivan laitteen viivettä laitteelta palvelimelle ja toisinpäin. Tässä tutkimuksessa "IoT-laite" rakennettiin Raspberry Pi alustan pohjalle, johon liitettiin sitten NB-IoT moduuli. Tutkimuksessa kävi ilmi että häiriöttömässä eli ulko- tai lähellä ikkunaa tilasta lähetetystä viestin koosta (512 - 16 bittiä) riippuen viive laitteen ja palvelimen välillä oli n. 800 - 500 ms:a. Pienemmällä pakettikoolla saavutettiin siis pienemmät lähetysviiveet. Vastaavasti niin sanotun pahimman luokan skenaarion eli esim. kellarista tai muusta katvesisätilasta lähetetystä viestistä vastaavilla pakettikoolla viiveet olivat 4600 - 3600 ms:n luokkaa (Sultania, Mahfoudhi ja Famaey 2020).

Kaikki edellä mainitut tekniikat saavuttavat ainakin optimaalisissa olosuhteissa matalan viiveen yhteyden määritelmän. Täytyy tosin ottaa huomioon, että tutkimusparametrit vaihtelivat suuresti toisistaan ja osa tutkimuksista on toteutettu pelkästään tietokonesimulaatioilla eikä fyysisillä laitteilla joten niiden vertaileminen keskenään ei ole mielekäästä. Tutkimuksia etsittiin myös Sigfox-yhteydellä toimivista laitteista, mutta tästä oli saatavilla tutkimustietoa



Kuvio 12. Esineiden internetin langattomat verkkotekniikat viiveen mukaan jaoteltuna

varsin vähän, joten se jätettiin ulkopuolelle vertailussa, mutta hypotettisesti kuuluu LoRa:n kanssa samaa laatikkoon. Edellä mainittujen tutkimusten perusteella langattomista verkkotekniikoista muodostettiin karkea kuvaaja 12 tiedonsiirtonopeuden ja viiveen perusteella.

LTE ja 5G ovat alhaisten viiveiden ja suuren tiedonsiirtonopeuden perusteella kärjessä. Esineiden internetin langattomien verkkotekniikoiden tiedonsiirtonopeuksia käytiin läpi kappaleessa 3 ja 5G:n luvussa 2.2. NB-IoT:n tiedonsiirtonopeus jää edellämainituista paljon jälkeen ja voisi periaatteessa hakeutua samaan laatikkoon LoRa:n kanssa, mutta NB-IoT:n tiedonsiirtonopeus on kuitenkin LoRa-tekniikkaa huomattavasti korkeampi, joten se eroteltiin tähän kuvaajaan erillisenä laatikkona. Wi-Fi 5/6 jätettiin kuvaajasta pois, mutta kuuluu hypoteettisesti samaan laatikkoon LTE:n ja 5G:n kanssa. LTE-M taas pudotettiin tiedonsiirtonopeuden mukaan samaan laatikkoon BLE-yhteysien kanssa, koska tekniikalla on edellä mainittuja yhteyksiä huomattavasti pienempi tiedonsiirtonopeus. Kuvaajaan täytyy kuitenkin suhtautua kriittisesti sillä se on muodostettu vain yksittäisten tutkimusten perusteella ja esim. BLE tutkimuksessa viive mitattiin vain kahden laitteen välillä eikä huomioon ollut otettu verkossa kulunutta aikaa. Luotettavan kaavion luomiseen tarvittaisiin yhteneväiset tutkimukset samoilla parametreilla, mutta kuten edellä mainittiin on kuvaaja kuitenkin suuntaa antava.

6.4 Tulokset ja analyysi

Tutkimuksessa käytettiin kolmea langatonta verkkotekniikka viestin välittämiseen Azure IoT Hub:lle ja Raspberry Pi:n ja IoT Hub:n välisen yksisuuntaisen viiveen mittaamiseen. Tulokset olivat hieman yllättäviä sillä ne eivät poikenneet merkittävästi toisistaan. Kaikki mittaukset suoritettiin n. 3 minuutin aikana lähettämällä 80 kappaletta 200 tavun kokoisia paketteja 2 sekunnin välein toisistaan. Pakettien viiveistä laskettiin keskiarvo sekä keskihajonta ja kaikista langattomista yhteyksistä tehtiin nopeustestit.

LTE-tekniikkaa käytettäessä mittauspisteen ja lähimmän radiomaston välinen välimatka oli n. 6.8 kilometriä harvaksen asutulla maaseudulla. Raspberry Pi:n ja matkapuhelimen välinen etäisyys taas muutaman metrin. LTE-tekniikalla saavutettiin keskimäärin noin 131 ms:n viive Raspberry Pi:n ja IoT Hub:n välillä. Keskihajonta puolestaan oli noin 71 ms:n luokkaa ja lähetysnopeus uplinkin suuntaan noin 12 Mbit/s:a ja downlinkin suuntaan 84 Mbit/s:a. Keskimääräinen päästä päähän viive ei tunnu olevan edellisessä kappaleessa 6.3 mitattujen tutkimusten mukaan linjassa. Tosin edellisen kappaleen tutkimuksessa viestit lähetettiin suoraan laitteelta tukiasemalle LTE-yhteydellä tietokonesimulaatiossa, kun taas tässä työssä viestit välitettiin fyysisesti LTE-mobiilitukiaseman kautta. Tosin kantaman ollessa LTE-tekniikalla n. 12 kilometriä aiheuttaa tulos kuitenkin epäilyksiä.

5G-yhteydellä toistettu mittaus oli yllättävä. Simulointi toteutettiin, kuten LTE-simulaatiossa, mutta lähetysten keskiarvo oli 141 ms:a ja keskihajonta 57 ms:a. Erona LTE-simulaation oli testaus kaupunkiympäristössä, jossa oli enemmän signaalin kulkuun vaikuttavia esteitä, mutta lähimmän radiomaston välinen etäisyys oli vain n. 600 metriä. Latausnopeudeksi saavutettiin downlinkin suuntaan 500 Mbit/s ja uplinkin suuntaan noin 43 Mbit/s. Viiveeseen tosin saattavat vaikuttaa sekä 5G-verkon käyttäjämäärä kaupunkialueella ja esteet signaalin kulussa. Odotusarvona olivat kuitenkin LTE:tä pienemmät viiveet ja siksi niihin tulee suhtautua kriittisesti.

Vertailun vuoksi suoritettiin lisäksi viestin lähetys 802.11ac-standardin reitittimen kautta. Tässä Raspberry Pi:n ja reitittimen välinen matka oli myöskin muutaman metrin. Tässäkin hypoteesin pohjalta odotettiin huomattavasti alemmää viivettä kuin mitä tulokseksi saatu keskimääräinen noin 125 ms:n välinen viive antoi olettaa. Keskihajonta taas oli hieman pienempi

eli noin 53 ms:a ja lähetysnopeus uplinkin suuntaan n. 55 Mbit/s ja downlinkin suuntaan n. 95 Mbit/s. Ero kuitenkin LTE:n ja langalliseen verkkoon WLAN:n kautta yhdistettynä viiveellä on kuitenkin pieni. Sitä miksi ero näiden tekniikoiden välillä, on niin pieni on vaikea arvioida. Kaikki mittaukset molempien tekniikoiden osalta on listattuna liitteen kuvassa 14.

Tuloksiin täytyy suhtautua kriittisesti. Ne eivät tunnu olevan linjassa aikaisempien tutkimusten kanssa päästä päähän viiveen arvojen kanssa. On otettava huomioon, että aikaisemmat tutkimukset toteutettiin tietokonesimulaationa, kun taas tässä Pro gradu työssä käytyt tutkimukset fyysisellä tasolla. Vertauskohtaa haettaessa täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että aikaisempien tutkimusten niin kuin tämänkin pro gradu työn parametrit ja tutkimusasetelmat poikkeavat huomattavasti toisistaan eivätkä ne ole vertailukelpoisia keskenään. Tämän tutkimusasetelman puolesta ei pystytä arvioimaan kuitenkaan, että paljonko edellä mitatuista viiveistä kuluu Azuren pilvipalvelun palvelimen päässä ja onkin mahdollista, että valtaosa viiveestä syntyy nimenomaan Azuren palvelimella. Tarvittaisiin siis paljon tarkemmat mitarit arvioimaan saavutettua viivettä.

Positiivisena puolena kuitenkin sanottakoon, että kaikilla langattomilla tutkittavilla tekniikoilla kyettiin saavuttamaan yksisuuntainen matalaviiveinen yhteys, joka tässäkin työssä määriteltiin kappaleessa 6.3 Ciscon määritelmän mukaisesti 1 - 1000 ms:n välille. Tämä tukee hyvin reaaliaikaisuutta vaativissa sovelluksissa, mutta ei ihan teollisuuden erittäin vaativissa ympäristöissä, joissa millisekunnit painavat liikaa ja URLLC-yhteydet olisivat järkevämpi ratkaisu ja reunalaskentamahdollisuus harkintaan otettava mahdollisuus. Varsinkin kun keskihajonta oli tämän pro gradu tutkielman perusteella kaikissa yhteyksissä suurta. Tämä on kuitenkin suuntaa antava tutkimus, jota kannattaisi jatkokehittää paremmilla ja tarkemmilla keinoilla.

Tutkimuksen tulos on sinänsä itsessään kuitenkin vaatimaton ja lisätutkimusta kaivattaisiin ainakin 5G-yhteydellä lähetettyjen pakettien viiveistä sekä vertailua Azuren pilvipalvelun kuin MEC-arkkitehtuurin välillä. Tämän toteuttamiseksi kaivattaisiin kuitenkin oikealla 5G-yhteydellä toimiva laite, joita markkinoilla on tällä hetkellä varsin vähän. Näiden lisäksi olisi mielenkiintoista toteuttaa samankaltainen testi kuin tässä toteutettiin, mutta LoRaWAN-, NB-IoT- sekä LTE-M-tekniikoilla. Realistisen vertailukohdan saamiseksi tottakai mahdollisimman yhtäläisillä tutkimusasetelmilla vertailun onnistumiseksi.

7 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa tutustuttiin matalaviiveisiin verkkoyhteyksiin ja esineiden internetin langattomiin tekniikoihin sekä tehtiin katselmus 5G-verkkoihin että Microsoft Azuren pilvipalvelualustaan. Tutkimuksen pääkohteena oli löytää testattavaksi matalaviiveisellä 5G-yhteydellä toimiva IoT-laite, jolla pystyttäisiin mittaamaan päästä päähän viivettä IoT-laitteen ja Azuren pilvipalvelualustan välillä. Haussa kävi kuitenkin ilmi, että markkinoiden nykytilassa laitteita on tarjolla varsin vähän, niiden hinta ei palvele tutkimuksesta saatavaa hyötyä tai saatavuus on varsin heikkoa tai se sijoittuu teollisuuden puolen "tilauksesta toimitettaviin"ratkaisuihin.

Matalaviiveisen yhteyden testaus suoritettiin täten soveltaen simuloimalla Raspberry Pi alustalla "IoT-laitetta"ja lähettämällä tällä paketti Microsoft Azure:n pilvipalvelualustalle käyttäen LTE-, 5G- ja langattoman lähiverkon Wi-Fi 5-verkkoyhteyttä. Simuloinnin pohjalta erot tekniikoiden viiveiden välillä osoittautuivat varsin pieneksi eivätkä ne olleet linjassa aikaisempien tutkimusten kanssa. Tämän tutkimuksen jatkokehitysideana kaivattaisiin tarkempia lisätutkimuksia, jotta tutkimuksen tulosta voitaisiin pitää oikeasti luotettavana. Positiivisena puolena havainnoitiin kuitenkin, että kaikilla edellä mainituilla tekniikoilla pystytään saavuttamaan matalaviiveinen yhteys Azuren pilvipalvelualustalle, joka palvelee ajatusta reaaliaikaisen järjestelmän luomisesta.

5G-yhteydet mullistavat meidän tuntemamme maailmaa lisäämällä yhä useampia esineitä verkkoon osaksi esineiden internetiä. Erityisesti teollisuudessa pystyttäisiin hyödyntämään URLLC ja matalaviiveisiä yhteyksiä reaaliaikaiseen monitorointiin, seurantaan ja toiminnan ohjaamiseen, mutta myös kuluttajapuolella erityisesti pilvipelaamisen, virtuaalitodellisuus sekä itseohjautuvat ajoneuvot ovat päätään nostavia sovelluskohteita. Erityisesti reunalaskenta tuo tähän uusia mahdollisuuksia, mutta myös pilvipalvelualustat ovat yhtäläillä tärkeitä.

Lähteet

“5 Things to Know About 5G Drones”. 2021. Viitattu 9. lokakuuta 2021. <https://www.modalai.com/pages/5-things-to-know-about-5g-drones>.

Adelantado, Ferran, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melia-Segui ja Thomas Watteyne. 2017. “Understanding the Limits of LoRaWAN”. *IEEE Communications Magazine* 55 (9): 34–40. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>.

Ahmad, W. S. H. M. W., N. A. M. Radzi, F. S. Samidi, A. Ismail, F. Abdullah, M. Z. Jamaludin ja M. N. Zakaria. 2020. “5G Technology: Towards Dynamic Spectrum Sharing Using Cognitive Radio Networks”. *IEEE Access* 8:14460–14488. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2966271>.

“Azure Event Hubs — A big data streaming platform and event ingestion service”. 2021. Viitattu 28. syyskuuta 2021. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/event-hubs/event-hubs-about>.

“Azure Stack Edge Pro”. 2020. Viitattu 22. syyskuuta 2021. https://azure.microsoft.com/mediahandler/files/resourcefiles/azure-stack-edge-pro-datasheet/DATASHEET_Azure_Stack_Edge_Pro.pdf.

Boyes, Hugh, Bil Hallaq, Joe Cunningham ja Tim Watson. 2018. “The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework”. *Computers in Industry* 101:1–12. ISSN: 0166-3615. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361517307285>.

Cao, Weikun, Weiwei Xia, Da Sun, Feng Yan, Lianfeng Shen, Yinong Zhang ja Yingbin Gao. 2021. “A Hierarchical BLE Mesh Network for IoT and Performance Analysis”. Teoksessa *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 01–06. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685476>.

“Condition monitoring for industrial IoT”. 2021. Viitattu 27. syyskuuta 2021. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/architecture/solution-ideas/articles/condition-monitoring>.

Dawaliby, Samir, Abbas Bradai ja Yannis Pousset. 2016. "In depth performance evaluation of LTE-M for M2M communications". Teoksessa *2016 IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2016.7763264>.

Gavrilovska, Liljana, Valentin Rakovic ja Daniel Denkovski. 2020. "From Cloud RAN to Open RAN". *Wireless Personal Communications* 113 (elokuu). <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07231-3>.

"GET PEACE OF MIND with the Found LTE - GPS Dog Tracker". 2021. Viitattu 13. loka-kuuta 2021. <https://pebblebee.com/pages/found-lte-dog-tracker>.

Gomez, Carles, Joaquim Oller ja Josep Paradells. 2012. "Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology". *Sensors* 12 (9): 11734–11753. ISSN: 1424-8220. <https://doi.org/10.3390/s120911734>. <https://www.mdpi.com/1424-8220/12/9/11734>.

Gonçalves, Glauco E., Guto L. Santos, Leylane Ferreira, Élisson da S. Rocha, Lubnnia M. F. de Souza, André L. C. Moreira, Judith Kelner ja Djamel Sadok. 2020. "Flying to the Clouds: The Evolution of the 5G Radio Access Networks". Teoksessa *The Cloud-to-Thing Continuum: Opportunities and Challenges in Cloud, Fog and Edge Computing*, toimittanut Theo Lynn, John G. Mooney, Brian Lee ja Patricia Takako Endo, 41–60. Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-030-41110-7. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41110-7_3. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41110-7_3.

Gubbi, Jayavardhana, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic ja Marimuthu Palaniswami. 2013. "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions". Including Special sections: Cyber-enabled Distributed Computing for Ubiquitous Cloud and Network Services Cloud Computing and Scientific Applications — Big Data, Scalable Analytics, and Beyond, *Future Generation Computer Systems* 29 (7): 1645–1660. ISSN: 0167-739X. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X13000241>.

Hassan, Najmul, Kok-Lim Alvin Yau ja Celimuge Wu. 2019. "Edge Computing in 5G: A Review". *IEEE Access* 7:127276–127289. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938534>.

Hassan, Zozo, Hesham Ali ja Mahmoud Badawy. 2015. “Internet of Things (IoT): Definitions, Challenges, and Recent Research Directions”. *International Journal of Computer Applications* 128 (lokakuu): 975–8887.

“Hololens 2”. 2022. Viitattu 19. helmikuuta 2022. <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware>.

“Introduction to Azure Data Lake Storage Gen2”. 2020. Viitattu 29. syyskuuta 2021. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/storage/blobs/data-lake-storage-introduction>.

Ismail, Noor Laili, Murizah Kassim, Mahamod Ismail ja Roslina Mohamad. 2018. “A Review of Low Power Wide Area Technology in Licensed and Unlicensed Spectrum for IoT Use Cases”. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* 7 (2): 183–190. ISSN: 2302-9285. <https://doi.org/10.11591/eei.v7i2.1174>. <https://www.beej.org/index.php/EEI/article/view/1174>.

Kabalıcı, Yasin, ja Muhammad Ali. 2019. “Emerging LPWAN Technologies for Smart Environments: An Outlook”. Teoksessa *2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 24–29. <https://doi.org/10.1109/GPECOM.2019.8778626>.

Khan, Wazir Zada, Ejaz Ahmed, Saqib Hakak, Ibrar Yaqoob ja Arif Ahmed. 2019. “Edge computing: A survey”. *Future Generation Computer Systems* 97:219–235. ISSN: 0167-739X. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.050>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X18319903>.

“Low-latency network connections for industry”. 2021. Viitattu 25. syyskuuta 2021. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/architecture/solution-ideas/articles/low-latency-network>.

Mekki, Kais, Eddy Bajic, Frederic Chaxel ja Fernand Meyer. 2018. “Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT”. Teoksessa *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 197–202. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2018.8480255>.

Mohsin, Mustafa, Jordi Mongay Batalla, Evangelos Pallis, George Mastorakis, Evangelos K. Markakis ja Constandinos X. Mavromoustakis. 2021. “On Analyzing Beamforming Implementation in O-RAN 5G”. *Electronics* 10 (17). ISSN: 2079-9292. <https://doi.org/10.3390/electronics10172162>. <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/17/2162>.

Niknam, Solmaz, Abhishek Roy, Harpreet S. Dhillon, Sukhdeep Singh, Rahul Banerji, Jeffery H. Reed, Navrati Saxena ja Seungil Yoon. 2020. *Intelligent O-RAN for Beyond 5G and 6G Wireless Networks*. arXiv: 2005.08374 [eess.SP].

“Opening the RAN”. 2022. Viitattu 19. helmikuuta 2022. <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/open-ran-explained/>.

Pan, Jianli, ja James McElhannon. 2017. “Future Edge Cloud and Edge Computing for Internet of Things Applications”. *IEEE Internet of Things Journal* PP (lokakuu): 1–1. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2767608>.

Parekha, Chandresh, ja Jayeshkumar Patel. 2018. “OFDM Synchronization Techniques for 802.11ac WLAN”. *International Journal of Wireless and Microwave Technologies* 8 (heinäkuu): 1–13. <https://doi.org/10.5815/ijwmt.2018.04.01>.

Parkvall, Stefan, Erik Dahlman, Anders Furuskar ja Mattias Frenne. 2017. “NR: The New 5G Radio Access Technology”. *IEEE Communications Standards Magazine* 1 (4): 24–30. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2017.1700042>.

Patriciello, Natale, Sandra Lagen, Lorenza Giupponi ja Biljana Bojovic. 2018. “5G New Radio Numerologies and their Impact on the End-To-End Latency”. Teoksessa *2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CAMAD.2018.8514979>.

“Progressive-IOT Wireless open / close logger - NB-IoT”. 2021. Viitattu 13. lokakuuta 2021. <https://www.progressive-iot.com/product/wireless-open-close-logger-nb-iot/>.

Pötsch, Albert, ja Florian Hammer. 2019. “Towards End-to-End Latency of LoRaWAN: Experimental Analysis and IIoT Applicability”. Teoksessa *2019 15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/WFCS.2019.8758033>.

“Raspberry Pi 4 Computer Model B”. 2021. Viitattu 25. marraskuuta 2021. <https://datasheet.s.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf>.

“Reference - IoT Hub quotas and throttling”. 2021. Viitattu 28. marraskuuta 2021. https://docs.microsoft.com/fi-fi/azure/iot-hub/iot-hub-devguide-quotas-throttling?WT.mc_id=Portal-Microsoft_Azure_IotHub.

Sabella, D., N. Nikaen, A. Huang, J. Xhembulla, G. Malnati ja S. Scarpina. 2018. “A Hierarchical MEC Architecture: Experimenting the RAVEN Use-Case”. Teoksessa *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2018.8417826>.

Sabella, Dario, Alessandro Vaillant, Pekka Kuure, Uwe Rauschenbach ja Fabio Giust. 2016. “Mobile-Edge Computing Architecture: The role of MEC in the Internet of Things.” *IEEE Consumer Electronics Magazine* 5 (lokakuu): 84–91. <https://doi.org/10.1109/MCE.2016.2590118>.

“SENSORIIS®: Multi-protocol Wireless Sensor”. 2021. Viitattu 9. lokakuuta 2021. <https://www.samea-innovation.com/products/sensoriis/>.

Sultania, Ashish Kumar, Farouk Mahfoudhi ja Jeroen Famaey. 2020. “Real-Time Demand Response Using NB-IoT”. *IEEE Internet of Things Journal* 7 (12): 11863–11872. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3004390>.

“Use IoT Hub message routing to send device-to-cloud messages to different endpoints”. 2021. Viitattu 8. joulukuuta 2021. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/iot-hub/iot-hub-devguide-messages-d2c>.

“Welcome to Azure Stream Analytics”. 2021. Viitattu 30. syyskuuta 2021. <https://docs.microsoft.com/en-gb/azure/stream-analytics/stream-analytics-introduction>.

“What is Azure IoT Edge”. 2019. Viitattu 27. syyskuuta 2021. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/iot-edge/about-iot-edge?view=iotedge-2020-11>.

“What is Azure Network Function Manager?” 2021. Viitattu 23. syyskuuta 2021. <https://docs.microsoft.com/en-gb/azure/network-function-manager/overview>.

“What is Azure Sphere?” 2021. Viitattu 13. lokakuuta 2021. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure-sphere/product-overview/what-is-azure-sphere>.

“What is Azure Time Series Insights Gen2”. 2020. Viitattu 29. syyskuuta 2021. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/time-series-insights/overview-what-is-tsi>.

“What Is Low Latency?” 2021. Viitattu 5. helmikuuta 2022. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/data-center/data-center-networking/what-is-low-latency.html>.

Virdis, Antonio, Giovanni Nardini, Giovanni Stea ja Dario Sabella. 2020. “End-to-End Performance Evaluation of MEC Deployments in 5G Scenarios”. *Journal of Sensor and Actuator Networks* 9 (4). ISSN: 2224-2708. <https://doi.org/10.3390/jsan9040057>. <https://www.mdpi.com/2224-2708/9/4/57>.

“VIREBOX Koneälypohjaisia IoT-ratkaisuja nopeammin kuin koskaan”. 2021. Viitattu 10. lokakuuta 2021. <https://www.virelabs.com/fi/virebox/>.

“WISE-4250AS for Azure Sphere”. 2021. Viitattu 13. lokakuuta 2021. <https://buy.advantech.eu/I-O-Devices-Communication/Remote-I-O-Modules-Wireless-I-O-Modules/model-WISE-4250AS-A.htm>.

Liitteet

A Python koodi simuloidulle IoT-laitteelle

```
1
2 import random
3 import time
4 import datetime
5 from azure.iot.device import IoTHubDeviceClient, Message
6
7 CONNECTION_STRING = "XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX.azure-devices.net/"
8 + "XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX"
9 + "XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX"
10 TEMPERATURE = 20.0
11 HUMIDITY = 60
12 CO2 = 20.0
13 MSG_TXT = '{"temperature": {temperature},"humidity": {humidity},'
14 + '"co2": {co2},"timeInString": {timeInString}}'
15
16 def iot_hub_client_init():
17     client = IoTHubDeviceClient.create_from_connection_string(CONNECTION_STRING)
18     return client
19
20 def iot_hub_client_telemetry_sample_run():
21     try:
22         client = iot_hub_client_init()
23         print ( "IoT Hub device sending periodic messages, press Ctrl-C to exit" )
24         while True:
25
26             temperature = TEMPERATURE + (random.random() * 15)
27             humidity = HUMIDITY + (random.random() * 20)
28             co2 = CO2 + (random.random() * 20)
29             timestamp2 = datetime.datetime.utcnow()
30             timePart1 = timestamp2.strftime("%Y-%m-%d")
31             timePart2 = timestamp2.strftime("%H:%M:%S.%f")
32
33             msg_txt_formatted = MSG_TXT.format(temperature=temperature, humidity=humidity,co2=co2,
34             timeInString= "\"" +timePart1+"T"+timePart2 + "\"")
35
36             message = Message(msg_txt_formatted, message_id=None,
37             content_encoding=None,content_type='application/json',output_name=None)
38             print( "Sending message: {}".format(message) )
39
40             client.send_message(message)
41             print ( "Message successfully sent" )
42             time.sleep(10)
43
44     except KeyboardInterrupt:
45         print ( "IoT Hub client sample stopped" )
46
47 if __name__ == '__main__':
48     print ( "Press Ctrl-C to exit" )
49     iot_hub_client_telemetry_sample_run()
```

Kuvio 13. Python koodi simuloidulle IoT-datalle

B Simuloinnin tulokset

	802.11ac	LTE	5G
Nro.	Viive(ms)	Viive(ms)	Viive(ms)
1	170	145	91
2	138	227	156
3	127	27	173
4	156	114	228
5	162	210	141
6	126	40	198
7	95	215	115
8	28	155	227
9	194	272	189
10	231	34	146
11	85	173	62
12	120	169	229
13	136	269	111
14	58	36	108
15	51	95	104
16	104	234	104
17	100	294	131
18	121	11	171
19	69	212	151
20	123	17	54
21	85	194	143
22	74	129	130
23	69	111	205
24	128	282	139
25	108	161	133
26	43	145	137
27	70	87	140
28	170	67	173
29	207	88	113
30	129	63	93
31	257	104	78
32	95	80	196
33	212	194	56
34	203	46	127
35	103	82	196
36	83	144	107
37	250	182	276
38	101	138	131
39	223	159	42
40	126	12	250

	802.11ac	LTE	5G
Nro.	Viive(ms)	Viive(ms)	Viive(ms)
41	128	147	128
42	75	133	133
43	115	93	119
44	215	79	161
45	233	68	131
46	104	101	153
47	115	184	72
48	97	64	281
49	146	55	115
50	89	128	91
51	172	116	169
52	99	179	127
53	119	160	174
54	156	196	105
55	49	40	119
56	133	168	31
57	74	102	154
58	99	216	95
59	89	74	131
60	210	170	215
61	119	43	96
62	59	160	148
63	146	201	182
64	233	88	234
65	114	231	31
66	76	218	125
67	113	37	72
68	123	92	230
69	99	223	60
70	126	208	133
71	83	83	198
72	82	54	33
73	79	33	275
74	167	153	190
75	37	125	154
76	67	69	118
77	143	100	122
78	146	219	168
79	225	84	118
80	127	150	134

Kuvio 14. Tutkimuksen simuloinnin tulokset